

Высокоёмкие конденсаторы для 0,5-вольтовой наноэлектроники будущего

Александр Деспотули, Александра Андреева (Московская обл.)

В наноэлектронике с уменьшением технологических норм и напряжения электропитания до 0,5 В резко возрастает необходимость использования высокоёмких конденсаторов микронных размеров. Конденсаторы традиционных типов не обладают нужной плотностью ёмкости, радиационной и температурной стойкостью. В статье показана необходимость разработки наноионных суперконденсаторов (НСК) на основе плёнок передовых суперионных проводников (ПСИП). Потребность рынка в таких приборах – дело ближайшего будущего.

ВВЕДЕНИЕ

В портативных устройствах конденсаторы выделяются на фоне других компонентов своими большими размерами. С развитием наноэлектроники и связанных с ней критических технологий проблема создания конденсаторов и импульсных накопителей мик-

ронных размеров с высокими плотностями энергии (ρ_E), ёмкости (ρ_C) и мощности (ρ_W) резко обостряется.

Плотность транзисторов в интегральных схемах (ИС) ограничена возможностями отвода тепла, но не размерами самих приборов, поэтому управление тепловыми потоками в современных ИС становится основной задачей и стимулирует разработки экономичных транзисторов с ультранизким напряжением электропитания (V_{dd}). У процессоров фирмы Intel с уменьшением технологической нормы повышается частота функционирования и понижается V_{dd} (см. рис. 1).

На рис. 2 показан прогноз изменений к 2020 г. величины V_{dd} и длины затвора CMOS-транзисторов (прогноз ITRS-2006). Для наноэлектроники ближайшего будущего базовые технологии ещё не выбраны. Одна из возможных технологий – это полевые транзисторы на основе InSb с $V_{dd} = 0,5$ В [2].

В микросистемной технике, беспроводных технологиях и малогабаритных цифровых приборах потребительской электроники остро стоит проблема снижения расхода энергии на обработку 1 бита. Расчёты показывают, что для КМОП-приборов минимум потребляемой энергии достигается при $V_{dd} \leq 0,3$ В.

Среди технологий, которые могут стать базовыми при создании 0,5-вольтовой наноэлектроники, можно выделить следующие:

- низковольтные логика, память и аналоговые цепи [3, 4];

- первая в мире 100-милливольтовая интегральная КМОП [5];
- полевой транзистор на основе нанотрубки с высоким отношением проводимости во включенном и выключенном состоянии ($\sim 10^6$) и напряжением смещения $\approx 0,5$ В [6];
- полевой эффект для графена – нового перспективного 2D-материала, сочетающего химическую и механическую стабильность [7];
- молекулярные, одномерные нанопроволочные и гибридные приборы;
- 0,4-вольтовые наноионные переключатели на основе суперионных проводников с квантованной проводимостью [8].

Прогресс в разработке аналоговой интегральной 0,4..0,5-В электроники описывается в монографии [9].

Ниже обосновывается необходимость использования в будущей 0,5-вольтовой наноэлектронике [10, 11], беспроводных технологиях, микросистемной и космической технике, RFID, высокотемпературной электронике и др. твердотельных высокоёмких импульсных суперконденсаторов с быстрым ионным транспортом (БИТ) в двойном электрическом слое (ДЭС) на функциональных гетеропереходах «передовой суперионный проводник/электронный проводник (ПСИП)/(ЭП)». Такие наноионные суперконденсаторы (НСК) могут производиться по микроэлектронным технологиям. Плотности энергии и ёмкости НСК на 1 – 2 десятичных порядка выше, чем у конденсаторов традиционных типов с тонкими плёнками сегнетоэлектрических керамик (SiO_2 , ZrO_2 , HfO_2 и др.). «Генетический» недостаток последних – экспоненциально быстро возрастающие токи утечки при толщинах плёнки диэлектрика менее 2 нм. Частотный диапазон функционирования НСК определяется явлением БИТ в ДЭС и имеет теоретический предел $\sim 10^{10}$ Пц (300 К), что соответствует частоте перескоков подвижных ионов в объёме ПСИП.

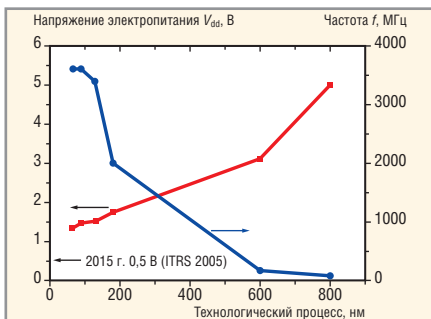


Рис. 1. Частота f и рабочее напряжение V_{dd} для процессоров фирмы Intel в зависимости от технологической нормы [1]

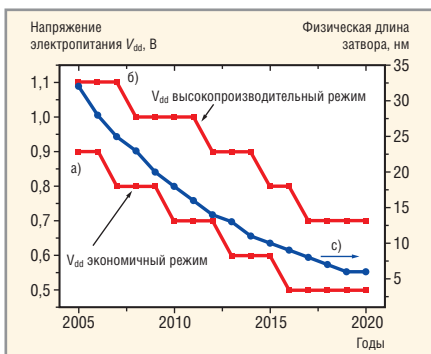


Рис. 2. Прогноз изменения V_{dd} и длины затвора КМОП-транзисторов (ITRS-2006)

- (а) экономичный режим,
- (б) высокопроизводительный режим,
- (с) длина затвора

Высокие ρ_C в НСК ($V_{dd} \approx 0,5$ В) не связаны с туннельным током утечки.

Для оценки порядковой стоимости рынка НСК предлагается формула:

$$V_{НСК} = \sum_j N_{ИС}^j A_{ИС}^j S, \quad (1)$$

где $V_{НСК}$ – валовая стоимость НСК, j – индекс сектора рынка, $N_{ИС}^j$ – число произведённых ИС, $A_{ИС}^j$ – средняя стоимость одной ИС, S – средняя доля площади ИС, занимаемая НСК. Например, в секторе RFID у дешёвых чипов конденсаторы энергетического блока занимают $\approx 1/4$ площади, т.е. можно принять $S \approx 0,25$. Согласно прогнозу [12], за период 2006 – 2016 гг. рынок RFID вырастет в 10 раз и достигнет $\sim \$26$ млрд.

Области применения субвольтовых высокоёмких микроконденсаторов

В цифровой электронике с увеличением частоты f и понижением V_{dd} возрастают токи i на внутренних шинах микросхем. Большие i создают источники шума, минимизировать влияние которых можно с помощью развязывающих конденсаторов C_{decap} . Если рассеиваемая мощность $P = 100$ Вт, $f = 1$ ГГц и $V_{dd} = 1,4$ В, то:

$$C_{decap} > 10 P f^{-1} V_{dd}^{-2} \sim 0,5 \text{ мкФ}. \quad (2)$$

При низких V_{dd} и высоких P значения $di/dt \approx P f V_{dd}^{-1}$ на нагрузках возрастают. Чтобы напряжение шумового источника, определяемого di/dt , не увеличивалось по отношению к V_{dd} , необходимо:

- увеличить площадь, занимаемую C_{decap} (но это ведёт к уменьшению производительности и функциональности ИС);
- увеличить у C_{decap} плотность ёмкости δ_C (мкФ/см²) и ρ_C (мкФ/см³).

Для наноприборов $1/f$ шум, спектральная плотность которого $\sim \alpha N^{-1} f^{-1}$, является фундаментальной проблемой (N – число электронных носителей в образце). В совершенных эпитаксиальных слоях константа $\alpha \sim 10^{-6} \dots 10^{-4}$, а в дефектных слоях она значительно больше. Например, в рМОSФЕТ $1/f$ шум возрастает в 10...100 раз при уменьшении размеров прибора с 350 до 130 нм [13]. Комплексный шум фильтруют с помощью параллельного соединения нескольких конденсаторов, отличающихся временем релаксации τ , ём-

костью, индуктивностью и эквивалентным сопротивлением. Конденсаторы с большими значениями τ и ρ_C (δ_C) используют также в низкочастотных фильтрах, усилителях, сейсмических детекторах, цепях питания и др.

Для миниатюрных автономных объектов критических и прорывных технологий требуются импульсные накопители с высокими значениями ρ_E , ρ_C и ρ_W . Субвольтовые источники, черпающие энергию из окружающей среды (свет, градиенты давления и температуры, вибрации и др.), и β -радиоизотопные микрогенераторы совместно с импульсными накопителями могут обеспечить длительное функционирование мобильных приборов потребительской электроники, сетей беспроводных микросенсоров и микророботов, пикоспутников, систем беспроводной радиочастотной идентификации (RFID) и др. По мнению автора концепции Smart Dust (J. Pister), автономные источники электропитания с $V_{dd} \leq 0,5$ В будут использоваться в цифровой и аналоговой электронике беспроводных самоподдерживающихся сетей с узлами, обладающими сенсорными, вычислительными и коммуникативными функциями [14]. В случае включения в силовой блок узлов 3-вольтовых литиевых элементов, для понижения напряжения необходимы DC/DC-преобразователи, в состав которых входят высокоёмкие конденсаторы.

Современные RFID-чипы с размерами $0,3 \times 0,3 \times 0,06$ мм включают структуры, преобразующие внешний радиочастотный сигнал в постоянный ток. В простейшем случае – это антенна, диод и конденсатор-накопитель ($\delta_C \sim 0,35$ мкФ/см²), определяющий функциональные возможности чипа.

Ёмкость конденсатора-накопителя RFID-чипа определяется формулой:

$$C \approx i \Delta t (V_{max} - V_{min})^{-1}, \quad (3)$$

где V_{max} и V_{min} – предельные значения напряжения, i – средний ток на нагрузке во время активной стадии работы, Δt – время передачи данных. У 0,5-вольтовых RFID величина $\Delta V = V_{max} - V_{min}$ должна быть $\approx 0,1$ В, что сильно отличается от $\Delta V \approx 1$ В для временных чипов.

Излучаемые RFID-чипом энергия $CV_{max}\Delta V$ и мощность $CV_{max}\Delta V/\Delta t$ зависят от дистанции и протокола радиобмена. Если V_{max} уменьшится в 3 ра-

за, а ΔV – в 10 раз, то для сохранения значений $CV_{max}\Delta V$ ёмкость C должна возрасти в ~ 30 раз, но на чипе с $\delta_C \sim 0,35$ мкФ/см² нет места для размещения конденсатора такой ёмкости. Приемлемо, когда $S \approx 0,1$, но конденсаторы традиционных типов не могут обеспечить $\delta_C \sim 50$ мкФ/см².

Операционные частоты конденсаторов-накопителей должны соответствовать несущей частоте радиобмена. В стандартах RFID используются частоты 135 кГц, 13,56 МГц, 2,45 ГГц, 860...960 МГц и др. Таким образом, RFID-чипам с напряжением электропитания 0,5 В необходимы конденсаторы с операционной частотой от 10^5 до 10^9 Гц. Условие $\delta_C \sim 50$ мкФ/см² определяет нижнюю границу δ_C для многих типов 0,5-вольтовых приборов.

Современные разработки микроконденсаторов

Сегнетоэлектрические структуры

Для плоского конденсатора напряжённость электрического поля пробоя F_{max} , диэлектрическая проницаемость k , V_{dd} , ρ_C и δ_C связаны соотношением:

$$V_{dd} = F_{max} (k \epsilon_0 / \rho_C)^{1/2} = F_{max} k \epsilon_0 / \delta_C, \quad (4)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ Ф м⁻¹. Поэтому переход к малым V_{dd} стимулирует разработку конденсаторов с предельно большими значениями ρ_C (δ_C), определяемыми V_{dd} и туннельным током утечки («генетический» недостаток конденсаторов традиционных типов с $d < 2$ нм).

Для субвольтовой электроники перспективны конденсаторы:

- на основе диэлектриков с высокой k (ZrO_2 и HfO_2), характеризующиеся $\delta_C \approx 2$ мкФ/см² при $d \approx 2$ нм и $V_{dd} \approx 1$ В [15];
- с тренчевыми структурами (большие аспектные отношения), где эффективная $\delta_C \approx 3$ мкФ/см² при толщине пленки SiO_2 4,5 нм [16] и $\delta_C > 20$ мкФ/см² при формировании в тренчах слоёв диэлектриков с $k \approx 15 \dots 20$ [17];
- на основе сегнетоэлектрических керамик, например PZT ($k \approx 900$), при этом достигается $\delta_C \approx 3$ мкФ см⁻² [18].

Для наноионных суперконденсаторов (НСК) на основе ПСИП в ДЭС (d порядка размера атома) F_{max} может превышать 10^7 В см⁻¹, поэтому на гладких электродах $\delta_C \sim 100$ мкФ см⁻² [11]. В НСК с тренчевыми структурами эффективные значения $\delta_C \sim 1000$ мкФ см⁻².

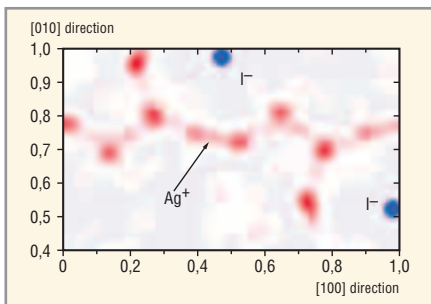


Рис. 3. Усреднённое по времени распределение плотности ионов Ag^+ в каналах проводимости кристаллической структуры $RbAg_4I_5$ [30]

Разработки конденсаторов на основе сегнетоэлектриков ($k \sim 1000$) показывают, что в тонких плёнках величина k значительно уменьшается. Многослойные сегнетоэлектрические конденсаторы ультраплотного поверхностного монтажа (УППМ) в наименьшем корпусе (01005 EIA) имеют размеры $0,4 \times 0,2 \times 0,2$ мм и максимальную ёмкость $0,01$ мкФ при $V_{dd} = 6,3$ В ($\rho_C \approx 1$ мкФ мм⁻³ и эффективная $\delta_C \approx 13$ мкФ см⁻²) [19]. Низкочастотная ёмкость эпитаксиальных гетероструктур $ScRuO_3/SrTiO_3 \approx 26$ мкФ см⁻², что сильно отличается от номинального значения $\delta_C = \epsilon_0 k/d = 160$ мкФ см⁻² при $k = 490$ и $d = 2,7$ нм [20]. В конденсаторах на основе тонких плёнок (5...30 нм) перовскитов при $V_{dd} = 0,65...4,0$ В обычно $\delta_C = 12,5...2,5$ мкФ см⁻² ($k \sim 70$) [21].

Работа при температурах выше 85°C становится обычной для малогабаритных источников. Стандартным требованием является гарантированное функционирование электронного компонента при 125°C в течение 10 лет. Многослойные сегнетоэлектрические конденсаторы функционируют на частотах до 10^9 Гц и обеспечивают $\rho_C \approx 3$ мкФ/мм³ при размерах $1,6 \times 0,8 \times 0,6$ мм. Недостатками таких конденсаторов являются уменьшение ρ_C с увеличением F и низкая стойкость керамики к повышенным температурам и F [22].

Таким образом, современные сегнетоэлектрические конденсаторы не отвечают требованиям $\delta_C - V_{dd}$ масштабирования и не подходят для ряда критических технологий.

Танталовые миниатюрные конденсаторы

Высокоёмкие танталовые конденсаторы могут функционировать вплоть до температур 175°C. Рабочее

напряжение V_{dd} с повышением температуры уменьшается следующим образом: 6,3 В (85°C), 4 В (125°C), 3,2 В (150°C) и 2,1 В (175°C). Ёмкость конденсаторов уменьшается в интервале $10^3...10^4$ Гц. При переходе от корпуса 3216 к корпусу 01005 ρ_C должна уменьшиться в 5...10 раз (до $\rho_C \approx 0,17...0,08$ мкФЧмм⁻³), что характерно и для сегнетоэлектрических УППМ-конденсаторов.

Конденсаторы на основе нанодиэлектриков с $k \sim 10^7...10^{10}$

В ряде работ [23, 24] представлены экспериментальные данные для конденсаторов с нанодиэлектриками, которым приписываются гигантские $k \sim 10^7...10^{10}$ и огромный потенциал в области хранения энергии [24 – 26]. Анализ показывает неправомерность таких ожиданий.

Для плоского конденсатора поверхностная плотность заряда δ_Q на атомарно гладких электродах ограничена $\delta_{Qmax} \sim 1,5 \times 10^{-4}$ Кл см⁻² (заряд ионов одного знака на кристаллографических плоскостях с малыми индексами, концентрация $n \sim 10^{15}$ см⁻³), поэтому:

$$kF \leq \delta_{Qmax}/\epsilon_0 \approx 1,5 \times 10^9 \text{ В см}^{-1}, \quad (5)$$

где $F = V/d$, а V – напряжение на электродах.

Согласно (5), при $k \sim 10^7...10^{10}$ максимальное допустимое значение F_{max} в нанодиэлектрике должно быть мало ($\sim 10^2...10^{-1}$ В см⁻¹) по сравнению с пробивным полем обычных диэлектриков ($\approx 2 \times 10^6$ В см⁻¹). В приближении нулевой толщины электродов максимальная плотность энергии в плоском конденсаторе:

$$\rho_E \sim \epsilon_0 k F_{max}^2 / 2. \quad (6)$$

При $kF_{max} \approx \delta_{Qmax}/\epsilon_0$ выражение (6) можно переписать в форме:

$$\rho_E < \sim \delta_{Qmax} F_{max} / 2, \quad (7)$$

где $F_{max} \sim 10^2...10^{-1}$ В см⁻¹. Это доказывает необоснованность надежд использования нанодиэлектриков с гигантской восприимчивостью для хранения энергии.

Суперконденсаторы с жидкими электролитами

Возможность использования подвижных ионов для хранения заряда и энергии реализуется в приборах с

ДЭС, называемых суперконденсаторами. В случае жидких электролитов на электродах с развитой внутренней поверхностью достигаются $\rho_C \sim 1000$ мкФ/мм³ (в пересчёте на площадь внутренней поверхности $\delta_C \sim 15$ мкФ/см² [27]), но частоты функционирования приборов низки, а их конструкции несовместимы с вакуумными технологиями.

Таким образом, рассмотренные выше конденсаторы и накопители традиционных конструкций не способны к эффективному $\delta_C - V_{dd}$ -масштабированию и достижению $\rho_C \approx 1$ мкФ/мм³ при $V_{dd} \approx 1$ В. Для нанoeлектроники и критических технологий необходимы субвольтовые импульсные накопители с частотами функционирования $10^5...10^9$ Гц.

Передовые суперионные проводники (ПСИП) – твёрдые электролиты (ТЭ) и суперконденсаторы на их основе

Рекордно высокие частотно-ёмкостные характеристики могут быть достигнуты с помощью когерентных ПСИП/ЭП гетеропереходов [28, 29]. ПСИП имеют кристаллическую структуру, близкую к оптимальной для БИТ. В жёсткой ионной подрешётке ПСИП имеются структурные подвижные ионы другого знака. Распределение ионной плотности Ag^+ в каналах проводимости в ПСИП $RbAg_4I_5$ (300 К) показано на рис. 3 [30]. ПСИП имеют рекордно высокий уровень ион-транспортных характеристик: ионная проводимость $\sigma_i \approx 0,3$ Ом⁻¹ см⁻¹ ($RbAg_4I_5$, 300 К), энергия активации, $E_i \approx 0,1$ эВ, что определяет температурно-зависимую концентрацию подвижных ионов $n_i \sim N_i \exp(-E_i/k_B T)$, способных к движению в каналах проводимости ($N_i \approx 10^{22}$ см⁻³, $n_i \sim 2 \times 10^{20}$ см⁻³, 300 К).

Общая классификация твердотельных ионных проводников в координатах ионной и электронной проводимости ($\sigma_i - \sigma_e$) представлена на рис. 4 [10, 28]. Граница области 7-8 определяет верхний предел значений σ_i для гипотетических ПСИП. По определению, эти ионные проводники характеризуются $E_i \approx k_B T$ (300 К), что должно обеспечить при комнатной температуре $\sigma_i \sim 2$ Ом⁻¹ см⁻¹ для подвижных ионов Ag^+ и $\sigma_i \sim 8$ (20) Ом⁻¹ см⁻¹ для легких подвижных ионов Li^+ (H^+).

К семейству $RbAg_4I_5$ принадлежит ряд ПСИП-ТЭ с подвижными ионами Cu^+ или Ag^+ . Некоторые из соединений термодинамически стабильны в области температур вблизи комнатной ($\alpha-RbAg_4I_5$, $CsAg_4I_{2-x}I_{3+x}$, $RbCu_4Cl_3I_2$ и др.), а большинство – при повышенных температурах (50...120°C).

Суперконденсаторы на основе ПСИП-ТЭ разрабатываются уже в течение нескольких десятилетий (могут иметь повышенную радиационную стойкость 4У), однако δ_C их гетеропереходов (с произвольными, не контролируемыми по структуре гетерограницами ПСИП/ЭП), составляют $10^2...10^1$ мкФ/см² на частотах $10^{-2}...10^3$ Гц. Низкие операционные частоты гетеропереходов ПСИП-электрод, а следовательно, невысокая $\rho_{\text{в}}$ суперконденсаторов есть следствие нарушения условий для БИТ в молекулярно тонких ДЭС на гетерограницах ПСИП/ЭП. Произведение максимальной частоты f_{max} функционирования гетероперехода ПСИП/ИЭП и δ_C является обобщённой ёмкостно-частотной характеристикой. Для типичных гетеропереходов, например $RbAg_4I_5/Pt$ [31], указанное произведение $\delta_C f_{\text{max}}$ составляет $\sim 1...10^1$ Гц мкФ см⁻². Такого же порядка оказываются произведения $\delta_C f_{\text{max}}$ для гетеропереходов с жидкими электролитами.

В Институте проблем технологии микроэлектроники РАН проводятся исследования и разработки, относящиеся к области наноионики передовых суперионных проводников (ПСИП) – новому научно-техническому направлению [28]. Объектами исследований являются нано- и микроструктуры на основе ПСИП. Гетеропереходы ПСИП/ЭП – ключевые функциональные структуры в приборах с ДЭС. В таких приборах влияние гетерограниц на ионный транспорт является определяющим, поэтому основной подход наноионики ПСИП состоит в сохранении на гетерограницах концентрации и высот потенциальных барьеров для перескоков подвижных ионов (на уровне значений в объеме ПСИП).

Создание модельных плёночных накопителей на основе ПСИП

Для достижения высоких значений $f_{\text{max}}\delta_C$ на гетеропереходах ПСИП/ЭП необходимо:

- формирование атомарно чистого и резкого контакта ПСИП/ЭП;
 - обеспечение минимального разупорядочения структуры в слое ПСИП, прилегающем к ЭП, что реализуется на когерентных границах ПСИП/ЭП;
 - обеспечение определённого сочетания и взаимного расположения элементов симметрии гетерограницы ПСИП/ЭП и элементов симметрии каналов БИТ в структуре ПСИП.
- Для достижения указанных целей применялись методы кристаллохимического дизайна гетерограниц ПСИП/ЭП [28, 29]. Были разработаны и синтезированы гетероструктуры ПСИП/ЭП (прототипы НСК) с $\delta_C \approx 100$ мкФ см⁻² и $f_{\text{max}} \approx 10^6$ Гц (рекордно высокие значения произведения $\delta_C f_{\text{max}} \sim 10^8$ Гц мкФ см⁻²) [10, 11].

На рис. 5 показаны частотно-ёмкостные характеристики $\delta_C = \delta_C(f)$ для типичного гетероперехода ПСИП/ЭП ($RbAg_4I_5/Pt$ [31]), созданного без учёта выполнения трёх вышеперечисленных условий, и экспериментальной двухэлектродной ячейки на основе ПСИП [10, 11].

Частотно-ёмкостные характеристики [10, 11] получены путём сравнения осциллограмм «заряд-разряд» для экспериментальной двухэлектродной ячейки и стандартного конденсатора известной ёмкости. П-импульсы внешнего напряжения прикладывались к цепочке, содержащей соединённые последовательно экспериментальную ячейку (или стандарт-

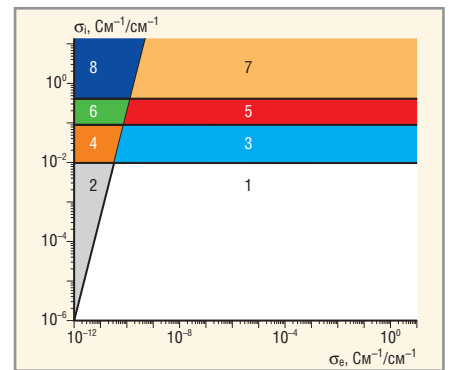


Рис. 4. Классификация твердотельных ионных проводников в координатах $\sigma_i - \sigma_e$ [10]

- 2, 4 и 6 – известные твёрдые электролиты (ТЭ), т.е. материалы с $\sigma_i \gg \sigma_e$;
- 1, 3 и 5 – известные смешанные ионо-электронные проводники;
- 3 и 4 – суперионные проводники (СИП), у которых $\sigma_i > 0,001$ Ом⁻¹см⁻¹;
- σ_e – произвольное значение;
- 4 – СИП и одновременно ТЭ, $\sigma_i > 0,001$ Ом⁻¹см⁻¹, $\sigma_i \gg \sigma_e$;
- 5 и 6 – передовые суперионные проводники (ПСИП); где $\sigma_i > 10^{-1}$ Ом⁻¹см⁻¹ (300 К), $E_i \approx 0,1$ эВ, σ_e – произвольное значение;
- 6 – ПСИП и, одновременно, ТЭ, $\sigma_i > 10^{-1}$ Ом⁻¹см⁻¹, $E_i \approx 0,1$ эВ, $\sigma_i \gg \sigma_e$;
- 7 и 8 – гипотетические ПСИП, у которых $E_i \approx k_B T \approx 0,03$ эВ (300 К);
- 8 – гипотетические ПСИП и одновременно ТЭ

ный конденсатор) и балластный резистор R. Экспериментальная ячейка объёмом $\approx 0,0036$ мм³ (компонент УППМ 01005 имеет объём $\approx 0,016$ мм³) имела тонкоплёночные электроды общей площадью $\approx 0,08$ мм² (0,04 +

Мы переключаем ваше будущее!

КОНЦЕВЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ
DIP-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ
ТАКТОВЫЕ КНОПКИ
ДВИЖКОВЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ

Diptronics, тайваньский лидер в разработке и производстве переключателей, специализируется в этой области с 1985 г.

DIPTRONICS MANUFACTURING INC.
No. 110, Wugong 3rd Road, Wugu Shiang, 24889, Taipei County, Taiwan
Tel.: +886 2 2298 9123 <http://www.dip.com.tw> E-mail: dip@dip.com.tw

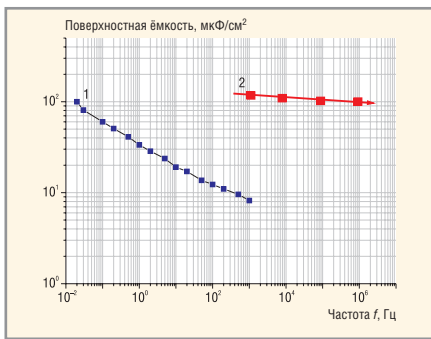


Рис. 5. Частотно-ёмкостные характеристики
Типичный гетеропереход ПСИП/ЭП (RbAg₄I₅/Pt, 20°C, кривая 1) и экспериментальная двухэлектродная ячейка на основе ПСИП (155°C, кривая 2)

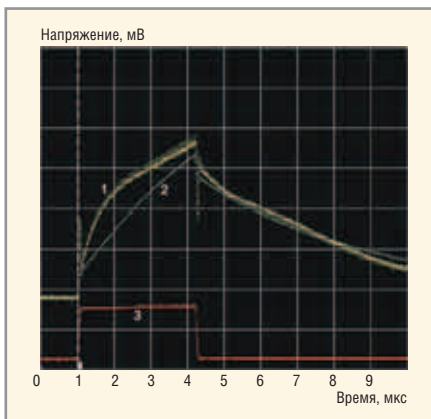


Рис. 6. Временная зависимость напряжения при заряде-разряде экспериментальной ячейки и конденсатора ёмкостью 0,047 мкФ через балластный резистор R = 100 Ом
(1) – ячейка при 155°C,
(2) – конденсатор 0,047 мкФ, соединённый последовательно с резистором номиналом 10 Ом (вертикальный масштаб – 100 мВ/дел.);
(3) – напряжение от внешнего генератора (вертикальный масштаб 500 мВ/дел.) для случаев (1) и (2)

+ 0,04 мм²). Толщина ячейки составляла ≈ 0,03 мм, площадь основания ячейки на кремниевой подложке ≈ 0,12 мм².

Изменение напряжения на экспериментальной ячейке (или на стандартном конденсаторе) в процессах «заряд-разряд» показано на рис. 6. Изменение времени заряда (разряда) задавали балластным резистором R.

У экспериментальной ячейки эффективное значение δ_C составляет ≈ 1 мкФ мм⁻² (100 мкФ см⁻²) на частотах до ≈ 10⁶ Гц (см. рис. 6), а плотность мощности $\rho_W \approx 0,3$ Вт мм⁻³ (3 × 10² Вт см⁻³), что в 3 раза больше, чем у массивных суперконденсаторов, которые имеют распределённые углеродные электроды, пропитанные жидким электролитом (объём ~ 1 см³, V_{dd} ≈ 2,5...2,7 В, операционные частоты не выше 10³ Гц).

Плотность энергии ρ_E в ячейке составляет ≈ 10⁻⁴ Дж мм⁻³ (10⁻¹ Дж см⁻³). Это в 36 раз меньше, чем у массивных суперконденсаторов, где произведение $\rho_W \rho_E \approx 4 \times 10^2$ Дж² с⁻¹ см⁻⁶ (у ячейки произведение $\rho_W \rho_E$ – величина в 10 раз меньшая). Однако, изменением конструкции можно уменьшить объём ячейки в 10 раз, сохранив на прежнем уровне запасаемую ячейкой энергию и генерируемую мощность. В результате при объёме ≈ 0,0004 мм³ произведение $\rho_W \rho_E$ в 10 раз превысит $\rho_W \rho_E$ массивных суперконденсаторов.

Эксперименты для ячейки объёмом ≈ 0,0036 мм³ показали:

- эффективная плотность ёмкости δ_C сравнительно слабо зависит от f вплоть до частот ≈ 10⁶ Гц (см. рис. 5);
- при напряжении на ячейке $U > 0,2$ В эффективная ёмкость δ_C возрастает с увеличением напряжения;
- ячейка может длительно функционировать при температурах 70...170°C;
- на частоте ≈ 10⁶ Гц достигаются $\delta_C \approx 1$ мкФ мм⁻², $\rho_C > 10$ мкФ мм⁻³, $\rho_W \approx 0,3$ Вт мм⁻³, $\rho_E \approx 10^{-4}$ Дж мм⁻³.

Таким образом, показано, что плёночные импульсные накопители на основе ПСИП являются перспективными приборами для 0,5-вольтовой электроники и ряда критических технологий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В нанoeлектронике с уменьшением технологических норм и напряжения электропитания (до 0,5 В к 2016 – 2020 гг., ITRS-2006) резко возрастёт потребность в высокоёмких конденсаторах микронных размеров (фильтрация помех и низкочастотных 1/f шумов; сглаживание пульсаций, питание импульсных нагрузок при малых допустимых перепадах напряжения (~0,1 В); работа в условиях повышенных температур и проникающих ионизирующих излучений и т.д.).

Огромные вложения в исследования и разработки конденсаторов традиционных типов не привели к значительному росту плотности ёмкости, радиационной и температурной стойкости.

Выше предложена новая альтернативная концепция широкого использования в субвольтовой цифровой электронике и связанных с ней критических технологиях (беспроводные сети сенсоров и микророботов, микросистемная и космическая техника, высокотемпературная электроника, RFID и др.) импульсных наноионных суперконденсаторов (НСК) на

основе передовых суперионных проводников (ПСИП). По мнению авторов, разработки НСК позволят выйти в области зарождения новых знаний и технологий и способны вызвать кардинальные изменения на рынке передовых наноприборов и наукоёмкой продукции массового спроса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Grochowski E., Amavaram M. Energy per instruction trends in Intel microprocessors. Technology@Intel Magazine. March 2006.
2. Chau R., Datta S., Majumdar A. Opportunities and challenges of III-V nanoelectronics for future high-speed, low-power logic application. Compound Semiconductor Integrated Circuit Symp., 2005.
3. Isibashi K. и др. Low-voltage and low-power logic, memory, and analog circuit techniques for SoCs using 90 nm technology and beyond. IEICE Trans. Electron. 2006. V. E89-C.
4. Morita Y. и др. A 0.3-V operating, V_{th}-variation-tolerant SRAM under DVS environment for memory-rich SoC in 90-nm technology era and beyond. IEICE Trans. Fundamentals 2006. V. E89-A.
5. www.hitachi.com/New/cnews/E/2002/0205/0205.pdf.
6. Javey A. и др. High performance n-type carbon nanotube field-effect transistors with chemically doped contacts. Nano Letters. 2005. V. 5. P. 345–348.
7. Lemme M.C., Echtermeyer T.J., Baus M., Kurz H. A graphene field-effect device. IEEE Electron Device Letters. 2007. V. 28.
8. Banno N. и др. Solid-electrolyte nanometer switch. IEICE Trans. Electron. 2006. V. E89-C.
9. Chatterjee S., Pun K.P., Stanic N., Tsvividis Y., Kinget P. Analog Circuit Design Techniques at 0.5 V. Springer, 2007 (готовится к выпуску).
10. Десноулли А.Л., Андреева А.В. Суперконденсаторы для электроники. Современная электроника 2006. №5, №6.
11. Десноулли А.Л., Андреева А.В., Веденев В.В., Аристов В.В., Мальцев П.П. Высокоёмкие конденсаторы для ультраплотного поверхностного монтажа. Нано- и микросистемная техника. 2006. № 3.
12. www.idtechex.com.
13. Chew W., Yeo K. S., Chiu S. Effect of technology scaling on the 1/f noise of deep submicron PMOS transistors. Solid-State Electronics. 2004. V. 48.
14. www.dustnetworks.com.
15. Gusev E.P., Narayanan V., Frank M.M. Advanced high-k dielectric stacks with poly Si and metal gates: Recent progress and current challenges. IBM J. Res. Dev. 2006. V. 50. No. 4/5.
16. Black C.T. и др. High-capacity, self-assembled metal-oxide-semiconductor

- decoupling capacitors. IEEE Electron Device Lett. 2004. V. 25.
17. Klootwijk J. и др. Extremely high-density capacitors with ALD high-k dielectric layers. NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry. 2006. V. 220.
 18. www.st.com/stonline/press/news/year2005/t1701d.htm.
 19. Hisaki T. Murata's technology paves way for ultra-small capacitors. AEI May 2004.
 20. Stengel M., Spaldin N.A. Origin of the dielectric dead layer in nanoscale capacitors. Nature 2006. V. 443.
 21. Jo J.Y. и др. Thickness-dependent ferroelectric properties in fully-strained SrRuO₃/BaTiO₃/SrRuO₃ ultra-thin capacitors. Thin Solid Films. 2005. V. 486.
 22. Tsubota S. High-capacitance capacitors by Murata make smaller power supplies. AEI December. 2005.
 23. Saba S.K., Chakravorty D. One-dimensional organic giant dielectrics. Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89.
 24. Saba S.K., DaSilva M., Hang Q., Sands T., Janes D.B. A nanocapacitor with giant dielectric permittivity. Nanotechnology. 2006. V. 17.
 25. Cao Y., Irwin P.C., Younsi K. The future of nanodielectrics in the electrical power industry. IEEE Trans.on Dielectrics and Electrical Insulation. 2004. V. 11.
 26. Air force STTR 06 T002 topic descriptions. Nanodielectrics for high power capacitors and passive applications. www.acq.osd.mil/osbp/sbir/solicitations/sttr06/af06.htm.
 27. Cbmiola J. и др. Anomalous increase in carbon capacitance at pore sizes less than 1 nanometer. Science. 2006. V. 313.
 28. Despotuli A.L., Andreeva A.V., Rambabu B. Nanoionics of advanced superionic conductors. Ionics. 2005. V. 11.
 29. Andreeva A.V., Despotuli A.L. Interface design in nanosystems of advanced superionic conductors. Ionics. 2005. V. 11. № 1&2. P. 152–160.
 30. Hull S. Superionics: crystal structures and conduction process. Rep. Prog. Phys. 2004. V. 67.
 31. Карамов Ф.А. Суперинионные проводники. Гетероструктуры и элементы функциональной электроники на их основе. М.: Наука. 2002.



Новости мира News of the World Новости мира

3D-микроскоп для видеонаблюдений за живой клеткой

Извечная проблема исследователей микромира – получение достоверных изображений объектов хотя бы на клеточном уровне. Возможность предоставления информации в трёхмерном виде, да ещё и в формате видео, можно назвать пределом таких мечтаний. Похоже, давние чаяния учёных наконец-то сбылись.

Издание Technology Review – онлайн-вестник Массачусетского технологического института (MIT) – сообщает, что группа учёных MIT смогла разработать микроскоп, генерирующий 3D-видеоизображение клеток в реальном времени с очень высокой детализацией. Принцип работы нового 3D-видеомикроскопа схож с технологией создания стереоизображений с помощью компьютерного томографического сканера, работающего в рентгеновском диапазоне волн.

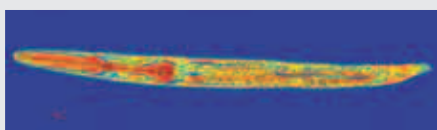
Извечная проблема изучения свойств клеток заключается в том, что клетки не могут поглощать видимый свет в количествах, достаточных для использования традиционных микроскопов. Разработчики из MIT пошли другим путём и использовали для создания нового 3D-микроскопа другое оптическое свойство клеток: рефракцию, т.е. способность клеток преломлять свет. Проходя через клетку, свет меняет своё направление и длину волны, при этом разные части клетки делают это по-разному, благодаря чему 3D-микроскоп из MIT способен показывать компоненты клетки с высокой детализацией.

По словам профессора физики Майкла Фелда (Michael Feld), руководителя команды разработчиков из MIT, попытки создать трёхмерное изображение клетки тра-

диционными оптическими способами являются ничем иным, как наблюдением за «управляемыми артефактами». Использование классических микроскопов приводит лишь к возможности наблюдения за фиксированными пятнами красящих реагентов; наблюдения за такими объектами совершенно не передают суть строения клетки. В то время как «наша технология позволит вам изучать клетки в их естественном состоянии без каких-либо дополнительных приготовлений. К примеру, вы имеете возможность наблюдать за хромосомами в процессе деления клетки или процессом ослабления раковой клетки при воздействии на неё уксусной кислотой».

Процесс создания трёхмерного изображения осуществляется методом комбинации множества снимков, сделанных под разными углами. В нынешней установке на генерацию одного трёхмерного снимка уходит порядка 0,1 с, что вполне достаточно для наблюдений за жизнью клетки в реальном времени.

Интересно отметить, что команда профессора Фельда в содружестве с учёными из Гарвардской медицинской школы (Harvard Medical School в составе Гарвардского университета) уже опробовали новое устройство на практике, при этом учёные могли визуально контролировать реакцию канцерогенного вируса бородавки человека (cervical cancer) на воздействие уксусной кислотой. По словам учёных, они и раньше знали, что это «работает», только не представляли реального прин-



ципа такого воздействия. Наиболее интересными областями применения таких микроскопов станут как изучение поведения живых клеток, так и «живые» испытания новых лекарственных препаратов.

www.technologyreview.com

Первый дисплей Samsung с поддержкой Displayport

Компания Samsung сообщила об успешном завершении разработки своего первого цветного жидкокристаллического дисплея, оснащённого интерфейсом Displayport – конкурента стандартам HDMI, DVI и UDI. Новая модель, начало массового производства которой намечено на второй квартал 2008 г., будет иметь 30" по диагонали, разрешение 2560 × 1600, количество отображаемых цветов – до 1,07 млрд. Прототип использует последовательный интерфейс с четырьмя линиями для передачи, по 2,7 Гбит/с на каждую, что обеспечивает суммарную пропускную способность в 10,8 Гбит/с.

В настоящее время в отрасли продолжают горячие дискуссии о том, какой же именно интерфейс – DVI, HDMI, UDI или Displayport – «выживет» в качестве преобладающего стандарта цифровых дисплеев с высоким разрешением. Первая версия спецификации Displayport была одобрена в мае 2006 г., она представляет собой не требующую лицензирования разработку для подключения главным образом компьютеров и мониторов, но подходит также для соединения компьютеров и домашних кинотеатров. К числу компаний, поддерживающих сейчас Displayport, относятся AMD, Intel, Dell, Hewlett-Packard, Lenovo, Nvidia, Philips и Samsung.

tgdaily.com