

# Суперконденсаторы для электроники

(часть 2)

**Александр Деспотули, Александра Андреева (Московская обл.)**

Во второй части статьи изложены основные тенденции и проблемы электроники ультраплотного поверхностного монтажа. Представлены данные по разрабатываемым суперконденсаторам нового класса – наноионным суперконденсаторам на основе передовых суперионных проводников, отличающихся специальной конструкцией функциональных гетеропереходов. Рассмотрены примеры применения суперконденсаторов в современной электронике.

## ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ УЛЬТРАПЛОТНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА КОМПОНЕНТОВ

В ближайшее десятилетие микро- и наноэлектроника должна решить ряд проблем, связанных с дальнейшим уменьшением размеров элементов и созданием:

- приборов с пониженным энергопотреблением и напряжением электропитания,
- приборов с высокой плотностью хранения заряда и энергии,
- интегральных схем (ИС) для работы в экстремальных условиях,
- интеллектуальных беспроводных сетей сенсоров и микророботов.

В настоящее время электронные компоненты ультраплотного поверхностного монтажа (УППМ) с линейными размерами меньше 500 мкм (корпус 0201) используются в большинстве портативных приборов (сотовые телефоны, автомобильные системы глобального позиционирования, многочиповые модули и др.). Согласно прогнозу ITRS-2004 (International Technology Roadmap for Semiconductors), УППМ-компо-

ненты с линейными размерами 150...300 мкм получают распространение в 2006–2015 гг. Автоматизированные технологии УППМ найдут широкое применение при массовом выпуске портативной электроники и объектов нано- и микросистемной техники (НМСТ) модульной конструкции.

С 1965 г. плотность транзисторов ИС возросла до  $10^9$  на чип. В 1960–1975 гг. для удвоения плотности требовался примерно 1 год, на рубеже XX–XXI вв. – 2 года, к 2018 г. уменьшение размеров КМОП-транзисторов прекратится из-за ограничений фундаментального характера. Тенденция понижения  $V_{dd}$  (напряжения питания) ИС показана на рис. 12. В настоящее время субвольтовый дизайн ИС становится главным направлением в исследованиях и разработках. В ближайшие годы проявятся такие тенденции:

- понижение напряжения электропитания ( $V_{dd}$ ) ИС до 0,5...0,7 В,
- уменьшение (<300 мкм) линейных размеров УППМ-компонентов,
- повышение верхнего предела рабочей температуры (>150°C) ИС,
- разработка новых типов конденсаторов с повышенными значениями  $\rho_C$ ,  $\rho_E$  и  $\rho_W$ ,
- появление источников электропитания в одном корпусе с ИС и др.

Тепловыделение ИС экспоненциально растёт с повышением плотности и уменьшением времени переключения КМОП-транзисторов. Современные процессоры рассеивают мощность  $\approx 100$  Вт, что близко к предельно возможным значениям. Для радикального решения проблемы перегрева предложен ряд стратегий. Например, транзисторы разделяют

на быстрые (time-critical tasks) и медленные, использующие пониженное напряжение питания  $V_{dd}$ . Согласно прогнозам ITRS-2004, к 2010 г. величина  $V_{dd}$  понизится до 1,0 В (0,7 В, экономный режим), а к 2018 г. – до 0,7 В (0,5 В, экономный режим). Корпорации Intel, AMD, Analog Devices уже сейчас выпускают процессоры, которые работают при напряжении питания 0,8 В. В феврале 2005 г. Hitachi и Renesas Technology объявили о разработке ИС SRAM с  $V_{dd} = 0,8$  В. В ИС с элементами нанометровых размеров и малыми значениями  $V_{dd}$  различные виды шумов и помех создадут серьезные проблемы. Фильтрация шумов и помех в ИС, а также согласование ИС в многочиповых модулях с низкими значениями  $V_{dd}$  потребует использования конденсаторов повышенной ёмкости. В настоящее время электронная промышленность производит УППМ-конденсаторы с рабочим напряжением 4...6 В. Снижение напряжения питания  $V_{dd}$  ИС позволит за счёт уменьшения толщины диэлектрика увеличить  $\rho_C$  конденсаторов традиционных конструкций. Другое перспективное решение – использование СК на основе передовых суперионных проводников (ПСИП) – твёрдых тел с кристаллической структурой, близкой к оптимальной для быстрого ионного транспорта (БИТ).

Прогресс технологий ведёт к повышению функциональности, мобильности и компактности изделий электроники и НМСТ. Ведущей тенденцией является гетероинтеграция, когда на одном чипе (Systems On Chip, SOC) или в одном корпусе (Systems in Package, SIP) объединяются различные устройства и модули. Для их согласования необходимы УППМ-компоненты. В период 1995–2005 гг. плотность таких компонентов в сотовых телефонах выросла в 3 раза (рис. 13). При этом УППМ-компоненты составляют до 90% комплектующих, занимают 80% места и создают 70% стоимости ([www.rfdesign.com/ar/radio\\_passive\\_integration\\_technology](http://www.rfdesign.com/ar/radio_passive_integration_technology)).

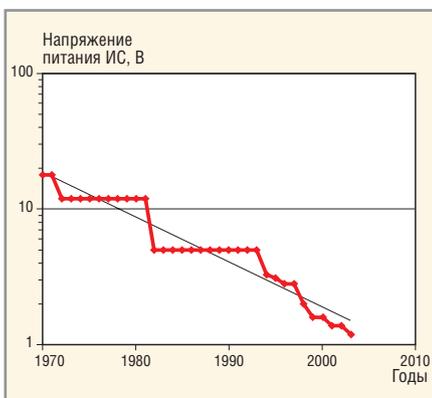


Рис. 12. Тенденция понижения напряжения питания ИС

Авионика, космические исследования, военные приложения и т.п. требуют микросточников с более высокими значениями  $\rho_E$ , чем у электрохимических приборов. Кардинально решают проблему электропитания генераторы прямого преобразования радиоактивного  $\beta$ -распада. Например, изотоп  $^{63}\text{Ni}$  хорошо подходит для многих приложений вследствие малой длины пробега  $\beta$ -частиц в кремнии ( $\approx 21$  мкм). Радиационная безопасность обеспечивается обычным корпусированием. В  $\beta$ -микрогенераторах с p-n-переходом при использовании плёнки изотопа  $^{63}\text{Ni}$  активностью 50...100 мКи достигнута мощность  $\sim 10^{-9}$  Вт (напряжение разомкнутой цепи  $\approx 130$  мВ, ток короткого замыкания  $\sim 3$  нА) [19]. СК на основе известных ПСИП имеют рабочее напряжение  $\approx 0,55$  В, поэтому они могут входить в состав гибридных источников, накапливать индуцированный  $\beta$ -излучением заряд (энергию) и генерировать высокие уровни импульсной мощности. Использование  $\beta$ -микрогенераторов ведёт к новой парадигме в электропитании электроники специального назначения: снабжение каждой ИС собственным  $\beta$ -микрогенератором.

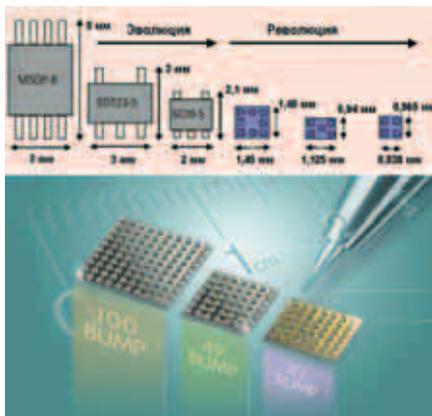
**Высокоёмкие конденсаторы для УППМ**

УППМ-конденсаторы на основе многослойных сегнетоэлектрических керамик X7R/X5R и Y5V выпускает ряд производителей. В последние годы активные и пассивные УППМ-компоненты достигли микронных размеров. Промышленность производит ряд аналоговых приборов микро-SMD (операционные усилители, регуляторы напряжения, детекторы, дискриминаторы, генераторы, датчики и др.). Наименьшие из них имеют посадочную площадку  $0,8 \text{ мм}^2$ , где размещены четыре электрода диаметром примерно 150 мкм. На рис. 14 показаны последние разработки чипов MICROSMД (National Semiconductor) с 42, 49 и 100 электродами.

Следует ожидать появления компонентов цифровой электроники в формате микро-SMD. Эффективная миниатюризация означает, что все компоненты электронной схемы имеют сопоставимо малые размеры. Конденсаторы повышенной ёмкости (0,1...100 мкФ) широко используются



**Рис. 13. Увеличение плотности компонентов поверхностного монтажа в сотовых телефонах**

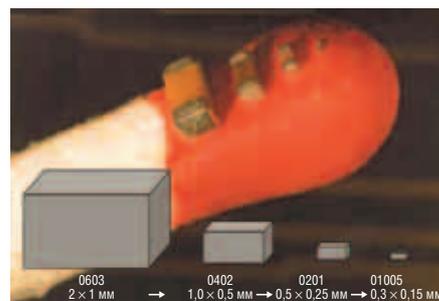


**Рис. 14. Прогресс в миниатюризации активных аналоговых компонентов**

в развязывающих и проходных цепях, цепях фильтрации шумов, линиях задержки, схемах генерации импульсов и др. Однако, номиналы 0,1...100 мкФ трудно обеспечить при линейных размерах корпуса меньше 1 мм (корпуса в стандарте EIA – 0603, 0402, 0201 и 01005). На рис. 15 и 16 показан масштаб и соотношение размеров для пассивных компонентов УППМ.

В 2003 г. в портативных приборах соотношение пассивных и активных компонентов составляло в среднем 20 : 1 [20]. Среди пассивных компонентов доля конденсаторов была порядка 40%, при этом половина из них – конденсаторы ёмкостью 0,01...0,1 мкФ. Высокопроизводительные автоматы корпорации Assembleon, предназначенные для сборки плат электроники, показаны на рис. 17 (www.assembleon.com/InformationCenter). Автоматы способны монтировать свыше 90 компонентов разных типов, включая УППМ-компоненты самого миниатюрного формата 01005 с производительностью  $10^4 - 10^5$  компонентов/час и точностью сборки 25...50 мкм.

Конденсаторы на основе керамик X7R/X5R и Y5V занимают всё боль-



**Рис. 15. Обозначение, масштаб и соотношение размеров корпусов пассивных компонентов ультра плотного поверхностного монтажа**

	0402	0201	01005
Площадь оснований	0,5 мм <sup>2</sup>	0,18 мм <sup>2</sup>	0,08 мм <sup>2</sup>
Отношение площадей	100%	36%	16%
Объём	0,25 мм <sup>3</sup>	0,054 мм <sup>3</sup>	0,016 мм <sup>3</sup>
Отношение объёмов	100%	22%	6%

**Рис. 16. Прогресс в миниатюризации пассивных компонентов**

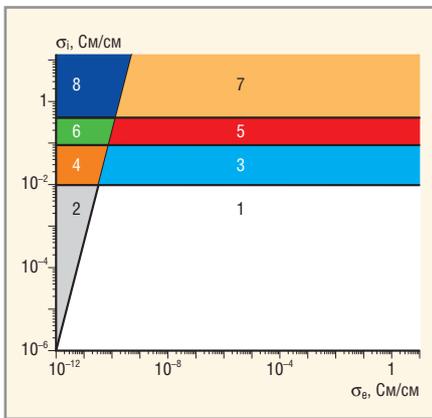


**Рис. 17. Высокопроизводительные автоматы для сборки компонентов поверхностного монтажа**

шую долю рынка, вытесняя танталовые и алюминиевые электролитические конденсаторы там, где частота ограничена 100 кГц. Отличительной особенностью керамических конденсаторов является сильная зависимость диэлектрической проницаемости, а следовательно, и ёмкости, от температуры и приложенного напряжения. Согласно Raumanok Publications, в настоящее время сегнетоэлектрические конденсаторы в корпусе 0201 пользуются всё возрастающим спросом. Доля конденсаторов в корпусе 0402 (см. рис. 18) сокращается, а самый миниатюрный формат УППМ – 01005 – получит распространение после 2006 г. (www.aei.dempa.net). Конденсаторы других типов в корпусах 0201 и 01005 на рынке не представлены. Очевидно, что СК на основе жидких электролитов не могут быть сделаны в современных форматах УППМ.



**Рис. 18. Изменение спроса на керамические конденсаторы разных форматов (ордината – доля конденсаторов в разных корпусах, %)**



**Рис. 19. Области существования различных твердотельных ионных проводников на  $\sigma_i - \sigma_e$  диаграмме:**

- 2, 4 и 6 – твердые электролиты (ТЭЛ),  $\sigma_i \gg \sigma_e$ ;
- 1, 3 и 5 – смешанные ион-электронные проводники;
- 3 и 4 – суперионные проводники (СИП),  $\sigma_i > 0,001 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ ,  $\sigma_e$  – произвольное значение;
- 4 – СИП и, одновременно, ТЭЛ (СИП-ТЭЛ),  $\sigma_i > 0,001 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ ,  $\sigma_i \gg \sigma_e$ ;
- 5 и 6 – передовые суперионные проводники (ПСИП),  $\sigma_i > 0,1 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ ,  $E \approx 0,1 \text{ эВ}$ ,  $\sigma_e$  – произвольное значение;
- 6 – ПСИП и, одновременно, ТЭЛ (ПСИП-ТЭЛ),  $\sigma_i > 0,1 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ ,  $E \approx 0,1 \text{ эВ}$ ,  $\sigma_i \gg \sigma_e$ ;
- 7 и 8 – гипотетические ПСИП с  $E - kVT \approx 0,03 \text{ эВ}$  при 300 К;
- 8 – гипотетические ПСИП-ТЭЛ

Одним из лидеров в области производства многослойных керамических конденсаторов является компания Murata Manufacturing. Конденсаторы этой компании в корпусах 0402, 0201 и 01005 с рабочим напряжением 6,3 В имеют максимальные ёмкости 1, 0,1 и 0,01 мкФ соответственно, что даёт для плотности ёмкости  $\rho_C$  значения 4, 2 и 1 мкФ/мм<sup>3</sup>. В корпусе 1210 (3,5 × 2,5 × 1,3 мм) компании Murata, TDK, Taiyo Yuden производят многослойные конденсаторы ёмкостью выше 100 мкФ ( $\rho_C \approx 10 \text{ мкФ/мм}^3$ ). Уменьшение  $\rho_C$  с уменьшением размеров можно отнести к сокращению доли полезного

объёма, вызванного корпусированием. Толщина отдельного слоя сегнетоэлектрической керамики приближается к 1 мкм (используется керамика с размером зерна менее 0,1 мкм), и в корпусе 1210 может быть 700 слоёв структуры. Ведутся разработки структур с числом слоёв более 1000. Это позволит поднять ёмкость многослойных структур до уровня алюминиевых электролитических конденсаторов ([www.tdk.co.jp](http://www.tdk.co.jp)). Разработки в области сегнетоэлектрических структур и многослойных керамических конденсаторов осуществляются в течение десятилетий, поэтому резкое повышение  $\rho_C$  могут обеспечить только прорывные инновации.

### Наноионные суперконденсаторы на основе передовых суперионных проводников

Нанонаука и нанотехнология к настоящему времени приобрели статус прорывных и решающих. Они влияют на развитие всех направлений современной электроники. В большинстве случаев используются приборы, создаваемые на основе микро- и наносистем электронных проводников. Вместе с тем существует класс полупорядоченных кристаллических веществ с высокой ионной проводимостью – суперионные проводники (СИП), наносистемы которых имеют перспективы использования в электронике. Классификация твердотельных ионных проводников дана на рис. 19 в координатах «ионная проводимость – электронная проводимость» ( $\sigma_i - \sigma_e$ ). Среди СИП можно выделить вещества с рекордно высоким уровнем ион-транспортных характеристик ( $\sigma_i > 0,1 \text{ См/см}$  при 300°К и энергия активации ионной проводимости  $E_i \approx 0,1 \text{ эВ}$ ). Это – ПСИП [21], о которых говорилось выше.

В наносистемах ПСИП условия для быстрого ионного транспорта (БИТ) нарушаются на гетерограницах. Проблема дизайна гетерограниц ПСИП-индифферентный электронный проводник (ИЭП) с целью сохранения БИТ в ДЭС впервые поставлена авторами в 2003 г. [18]. ИЭП – это электрод, который в определённом диапазоне потенциалов не вступает в химическое и электрохимическое взаимодействие с электролитом. В основе решения лежит идея

формирования нового вида материала с сохранением БИТ в ДЭС – нефарадеевских когерентных гетерограниц ПСИП-ИЭП. В 2004 г. выдвинуто новое научно-техническое направление: «наноионика ПСИП» [21]. Наноионика – раздел ионики твёрдого тела, имеющий в качестве предмета исследования новые свойства, явления, эффекты и практические приложения наносистем с БИТ. Как новый раздел науки, наноионика предложена в Институте проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов (ИПТМ РАН) в 1992 г. [22]. Кристаллоинженерия гетерограниц [23] является методологией наноионики ПСИП. Гетеропереходы ПСИП-ИЭП – ключевые функциональные структуры в полностью твердотельных приборах с ДЭС.

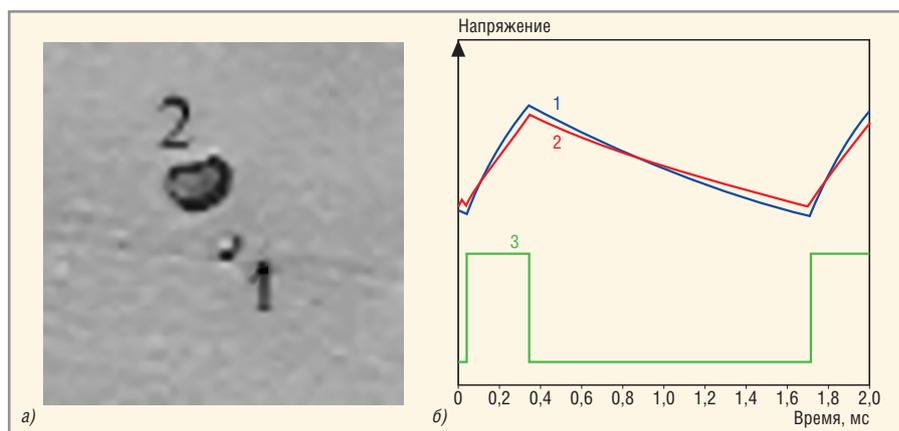
Задача прикладной наноионики ПСИП – создание тонкоплёночных приборов нового класса – наноионных суперконденсаторов (НСК) и сенсоров с когерентными нефарадеевскими переходами ПСИП-ИЭП. СК на основе ПСИП разрабатываются в течение нескольких десятилетий, однако достигнутые значения поверхностной удельной ёмкости  $\delta_C \sim 10 \text{ мкФ/см}^2$  и максимальные частоты перезарядки ДЭС  $f \sim 10...100 \text{ Гц}$  малы. Низкие значения  $f$ , невысокие  $\rho_W$  известных конструкций СК – следствие нарушения условий БИТ в молекулярно тонких ДЭС на гетерограницах ПСИП-ИЭП. Ожидается, что НСК обеспечат предельно высокие значения  $\rho_C, \rho_E$  и  $\rho_W$  [3]. В 2005–2006 гг. авторами теоретически и экспериментально осуществлён поиск состояний с высокой электрической ёмкостью на гетерогранице ПСИП-ИЭП. На рис. 20а и 20б показаны соответственно экспериментальный образец и его осциллограммы заряда-разряда. При измерениях образец включали последовательно с эталонным сопротивлением и подавали П-импульсы внешнего напряжения. Ёмкость образца оценивали путём сравнения с аналогичными осциллограммами стандартного конденсатора известной ёмкости. Температура образца –155°С. Представленные данные доказывают существование высокой ёмкости на гетеропереходе ПСИП-ИЭП и достижение  $\rho_C \sim 50 \text{ мкФ/мм}^3$ . Производимые в настоящее время лучшие серийные многослойные конденсаторы на основе

сегнетоэлектрических керамик имеют  $\rho_C \sim 5$  мкФ/мм<sup>3</sup> при объёме прибора  $\sim 1$  мм<sup>3</sup>. Корпус компонента 01005 УППМ имеет площадь основания 0,08 мм<sup>2</sup> и объём 0,016 мм<sup>3</sup>. Многослойные керамические конденсаторы компании Murata (<http://aci.dempa.net>) в таком корпусе имеют максимальную ёмкость 0,01 мкФ (рабочее напряжение 6,3 В, общая внутренняя площадь электродов более 1 мм<sup>2</sup>). Экспериментальная гетероструктура на основе ПСИП (рис. 20) на частотах  $\sim 2$  кГц при температуре 155°C имеет ёмкость  $\approx 0,3$  мкФ (площадь рабочего электрода  $4,5 \times 10^{-2}$  мм<sup>2</sup>, поверхностная плотность ёмкости 600 мкФ/см<sup>2</sup>), что обеспечивает в 30 раз большие значения  $\rho_C$ , чем у серийных конденсаторов 01005 Murata. Дальнейшие исследования и разработки в области гетероструктур ПСИП–ИЭП должны значительно поднять рабочую частоту полностью твердотельных СК. Это позволит приступить к созданию новых типов конденсаторов для УППМ (корпус 01005), доля которых к 2015 г. может составить  $\sim 40\%$ , как это следует из данных Raumanok Publications [1] и тенденций, представленных на рис. 18.

Эффективность традиционных конструкций конденсаторов резко уменьшается на малых масштабах из-за роста отношения поверхность–объём. Известные типы СК на основе жидких электролитов способны обеспечить значение произведения  $\rho_E \rho_W \sim 10^7 \dots 10^8$  Дж<sup>2</sup>/кг<sup>2</sup>с. На основе НСК могут быть созданы гибридные микроисточники с высокими значениями  $\rho_E$ ,  $\rho_C$  и  $\rho_W$ , базирующиеся на рациональном использовании ёмкостных свойств внутренних поверхностей раздела и с БИТ в ДЭС на гетеропереходах ПСИП–ИЭП. Прогресс технологий ведёт к повышению функциональности, мобильности и компактности портативной электроники, когда в одном корпусе объединяется множество устройств и модулей, для согласования которых необходимы высокоёмкие НСК. Поэтому уменьшение напряжения питания ИС до 0,5...0,7 В сделает привлекательным использование НСК в электронике и НМСТ [3].

### ПРЕДЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЁМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ

Ёмкостные накопители можно разделить на два основных класса: конденсаторы на основе диэлектриков



**Рис. 20. Экспериментальный образец СК, имеющего гетеропереходы со специальным граничным дизайном гетерограниц ПСИП–ИЭП, и осциллограмма его испытания:**

(а) образец СК (1, объём  $\approx 6 \cdot 10^{-3}$  мм<sup>3</sup>, видимая площадь электрода  $4,5 \cdot 10^{-4}$  см<sup>2</sup>, ёмкость 0,3 мкФ при 155°C)

и маковое зерно (2);

(б) осциллограмма заряда и разряда образца СК (1) и стандартного конденсатора ёмкостью 0,3 мкФ (2)

в одинаковых условиях через балластное сопротивление с помощью П-импульса (3)

(сегнетоэлектриков) и СК, где заряд и энергия накапливаются в ДЭС на гетеропереходе электронный проводник–твёрдый или жидкий электродит (жидкие электролиты несовместимы с микроэлектронными технологиями).

Из анализа формул максимального напряжения  $U_{\max}$  и максимальной энергии плоского конденсатора  $E_{\max}$  следует, что для достижения рекордно высоких значений  $\rho_E$  и  $\rho_C$  необходимо уменьшать толщину ДЭС  $d$  и/или повышать пробойную напряжённость электрического поля  $F_{\max}$  и относительную диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_r$  диэлектрика. Для СК  $d$  – величина порядка размера атома, поэтому лавинный пробой ДЭС невозможен. Величина  $U_{\max}$  для известных ПСИП с подвижными ионами Ag<sup>+</sup> и Cu<sup>+</sup>  $\approx 0,6$  В, что ведёт к рекордно высоким значениям  $F_{\max}$  (порядка молекулярного поля,  $\sim 5 \times 10^7$  В/см). Отсюда следует, что СК на основе ПСИП имеют потенциал для достижения предельно высоких значений  $\rho_E$  и  $\rho_C$ . Анализ показывает [3], что в области создания высокоёмких УППМ-конденсаторов наиболее перспективными являются сегнетоэлектрические конденсаторы и НСК. Зонная структура известных ПСИП подобна электронной зонной структуре диэлектриков (ширина зоны запрещённых для электронов энергий  $E_g > 3$  эВ). Конденсаторы с толщиной ДЭС  $\sim 0,1$  нм относятся к молекулярным приборам. Высокими характеристиками могут обладать СК с гетеропереходами нанотруб-

ка–ПСИП. Впервые возможность создания наноприборов БИТ обсуждалась в 1992 г. [22]. Наногибридные материалы с БИТ имеют большие перспективы. Например, в многослойных гетероструктурах с толщиной бислоя ПСИП–ИЭП  $\sim 4$  нм, образующих параллельно связанные НСК с поверхностной плотностью ёмкости  $> 10$  мкФ/см<sup>2</sup>, величина  $\rho_C$  превысит 50 Ф/см<sup>3</sup>. При напряжении на гетеропереходе 0,5 В будет достигнута  $\rho_E \sim 5$  Дж/см<sup>3</sup> ( $\sim 10^3$  Дж/кг). В [3] для гладких электродов со специальным дизайном гетерограниц ПСИП–ИЭП получены значения поверхностной плотности ёмкости  $\delta_C > 100$  мкФ/см<sup>2</sup>, что говорит о возможности создания на основе ПСИП наногибридных материалов с  $\rho_E \sim 10^4$  Дж/кг.

### ПРИМЕНЕНИЕ СК В СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

В портативной электронике с уменьшением размеров растёт отношение поверхность/объём компонентов, что ведёт к уменьшению  $\rho_C$ ,  $\rho_E$  и  $\rho_W$  конденсаторов и автономных источников энергии и мощности. Вместе с тем ряд факторов требуют роста значений  $\rho_C$ ,  $\rho_E$  и  $\rho_W$ . Приведём два примера.

1. Функционирование канала связи «прибор–человек» требует мощности, задаваемой физиологией органа восприятия и не зависящей от размеров прибора. Поскольку с уменьшением размеров источников уменьшаются не только абсолютные значения  $W$  и  $E$ , но и  $\rho_C$ ,  $\rho_E$  и  $\rho_W$ , то без повышения  $\rho_C$ ,  $\rho_E$  и  $\rho_W$

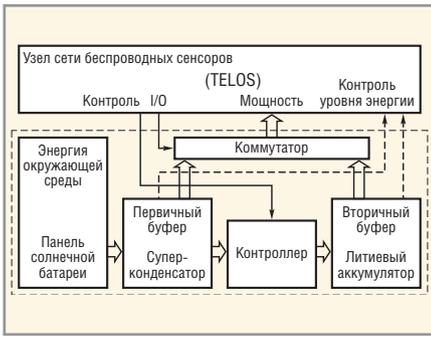


Рис. 21. Архитектура сенсорного узла TELOS беспроводной сети Prometheus

дальнейшая миниатюризация автономных приборов, используемых в связке «прибор–человек», оказывается невозможна. Сказанное не относится к каналам связи «прибор–прибор», о чём свидетельствует стремление освоить наноконструкции и нанотехнологии.

2. В беспроводных средствах связи и сетях автономных сенсоров и микроботов источники должны обеспечить в режиме радиопередачи высокие уровни мощности ( $W$ ), определяемые расстоянием уверенного приёма в степени 2...4, и энергии  $E$ , величина которой даётся выражением:  $E = WntN$ , где  $n$  – число импульсов, задаваемых протоколом (преамбула, номер узла, координаты, номер кода, адрес точки приёма, код поправок и т.д.),  $\tau$  – длительность отдельного импульса, а  $N$  – число последовательно передаваемых файлов. Удовлетворительное решение рассматриваемой задачи достигается использованием гибридных источников, включающих СК.

Развитие нано- и микроэлектроники, НМСТ, беспроводной связи и по-

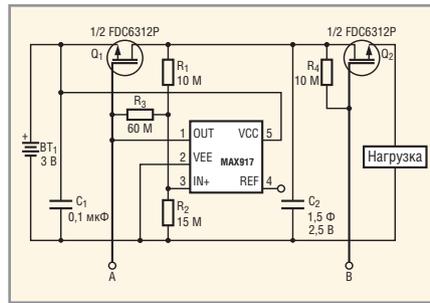


Рис. 22. Источник импульсной мощности на основе СК и миниатюрного литиевого элемента

явление процессоров с малым энергопотреблением создают условия для быстрого становления нового сектора рынка массовой электроники (системы беспроводных сетей сенсоров и микроботов). Использование энергии, рассеянной в окружающем пространстве (свет, перепад давлений и температур, вибрации, химические и биохимические процессы), позволяет развёртывать сети автономных сенсоров и микроботов с длительным сроком функционирования. Пронизывая всё доступное пространство, используя компьютерные технологии и Интернет, эти взаимодействующие между собой сети будут обеспечивать связь между физическим миром и растущей по экспоненте глобальной информационно-вычислительной инфраструктурой.

Одна из современных разработок в области беспроводных сенсорных сетей – система Prometheus (Университет Калифорнии, Беркли, США) с элементами интеллектуального управления энергоресурсами. Силовой блок каждого сенсорного

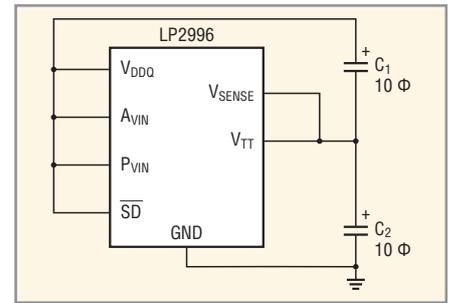


Рис. 23. Активный шинный терминатор для DDR-SDRAM на последовательно соединённых двух СК

узла TELOS (рис. 21) содержит солнечную батарею, суперконденсатор (первичный буфер), перезаряжаемую литиевую батарею (вторичный буфер) и контроллер управления. Нагрузка на литиевую батарею, которая при работе узла подвергается деградации (число циклов перезарядки 300 – 500), определяет срок службы системы. Наличие СК и контроллера позволяет оптимизировать нагрузку на литиевую батарею, а также выбрать режим эксплуатации сенсорного узла. Согласно оценкам [24], срок службы узла составит 43 года при уровне нагрузки 1%, 4 года при 10% и 1 год при 100%.

Электронные схемы с СК, питаемые малогабаритными источниками, позволяют формировать на нагрузке импульсы тока с большими значениями произведения  $EW$ . Изображённая на рис. 22 схема [25] обеспечивает с помощью СК  $C_2$  (ёмкость 1,5 Ф, рабочее напряжение 2,2 В) каждые несколько часов импульс тока до нескольких ампер длительностью до 2 с. Остальное время система находится в спящем режиме, во время которого потребляются микроамперные токи. Схема построена на основе двух транзисторных ключей  $Q_1, Q_2$  и компаратора на основе микросхемы MAX917. В спящем режиме при подаче положительного сигнала в точку А открывается ключ  $Q_1$  и СК заряжается от миниатюрного литиевого элемента. После достижения на СК напряжения 2,2 В компаратор закрывает ключ  $Q_1$ . При подаче положительного сигнала в точку В открывается ключ  $Q_2$ , и импульс тока с СК поступает в нагрузку.

В ряде приложений требуются СК большой ёмкости с рабочим напряжением, превышающим допусти-

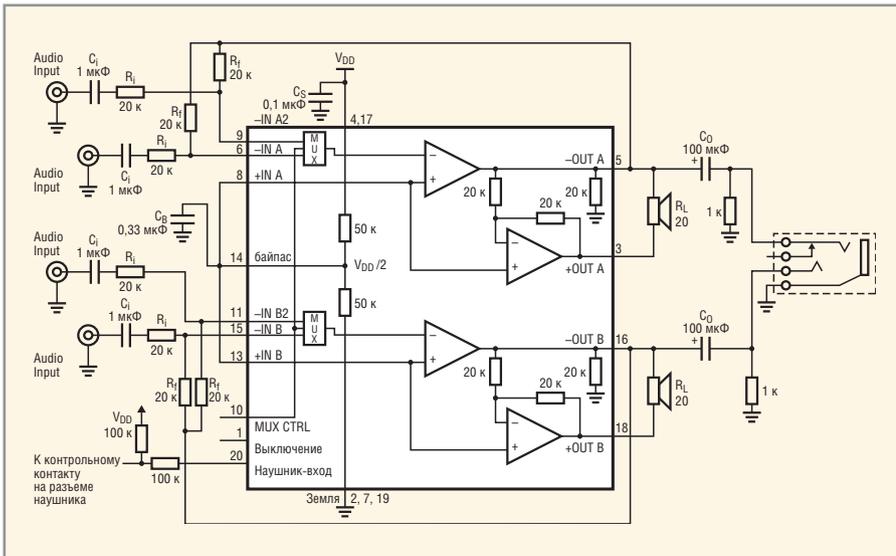


Рис. 24. Стерефонический аудиоусилитель мощности на базе MICROSMД типа LM4873

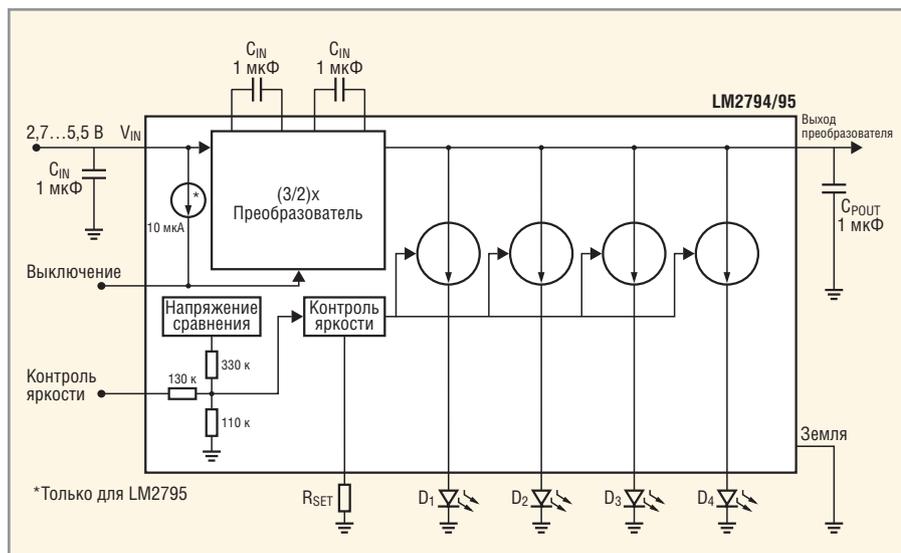


Рис. 25. Регулируемый драйвер светодиодов с аналоговым и PWM-контролем яркости на базе MICROSMД типа LM2794

мое значение для СК. В этом случае несколько однотипных СК соединяют последовательно. Возникает задача зарядки одним и тем же током нескольких СК до одинакового напряжения, т.к. разброс СК по емкостям, токам утечки и ESR может привести при зарядке и разрядке к недопустимо большим напряжениям на некоторых СК. На рис. 23 [26] представлена простая схема, которая обеспечивает источник питания шины DDR-SDRAM напряжением 5 В с помощью двух последовательно соединённых СК (10 Ф). Интегральный шинный регулятор, например, LP2996 компании National Semiconductor, предназначен для поддержания стабильного напряжения 2,5 В в общей точке последовательно соединённых СК.

Разработано множество схем использования СК в электронике. Например, на сайте [27] представлена схема микшера, предназначенного для смешения микрофонного сигнала с сигналом от цифровой камеры и подачи смешанного сигнала на видеомангитфон. СК используется в качестве источника питания, которого хватает по меньшей мере на 2 часа работы. Ряд схем на базе чипов MICROSMД, требующих использования конденсаторов повышенной ёмкости, приведены на сайте [28]. Рассмотрим два примера. На рис. 24 приведена схема стереофонического аудиоусилителя мощности с функцией стереонаушников, а на рис. 25 – схема регулируемого драйвера светодиодов с ШИМ и аналоговым конт-

ролем яркости. Схемы выполнены на базе MICROSMД типа LM4873 (посадочная площадка 1,99 × 2,49 мм, двадцать шариковых выводов) и LM2794 (2 × 2,4 мм, четырнадцать шариковых выводов) соответственно. Стереофонический усилитель при напряжении питания 5 В обеспечивает 2,1 Вт на нагрузку 4 Ом или 2,4 Вт на нагрузку 3 Ом при суммарном коэффициенте нелинейных искажений менее 1%. Во второй схеме при падении напряжения на Li-ионной батарее ниже 4,7 В микросхема LM2794 повышает напряжение на четырёх светодиодах до номинального уровня, что обеспечивает токи 4 × 20 мА. В схемах используются внешние СК с номиналами 0,1...100 мкФ, которые в настоящее время не могут быть выполнены в корпусах 01005 и 0201 УППМ.

Прогресс в разработке СК на основе ПСИП и создание НСК позволят осуществлять эффективную миниатюризацию, т.е. использовать активные компоненты и конденсаторы УППМ сопоставимо малых размеров.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание СК с высокими частотно-ёмкостными характеристиками и развитие соответствующего рынка ведёт к появлению новых областей знания, технологий и массового спроса (нано- и микросистемная техника, беспроводные сети сенсоров и микророботов). Современный менеджмент знаний объединяет стратегический менеджмент и менеджмент

инноваций в единый комплекс знаний и действий – стратегический инновационный менеджмент. Анализ научно-технологической деятельности ведущих корпораций показывает их ориентацию на стратегический инновационный менеджмент. Поэтому особую ценность приобретают исследования и знания, на основе которых в будущем может быть создана стратегически значимая продукция. В России сохраняются высокий уровень развития науки и возможности для проведения стратегического инновационного менеджмента в электронике.

## ЛИТЕРАТУРА

- Guo H., Lal A. Nanopower betavoltaic microbatteries. Transducers'03, The 12th Int. Conf. on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems, Boston, June 8–12, 2003.
- Dougherty J.P., Galvagni J., Sandborn P., Ulrich R. The NEMI Roadmap: Integrated Passives Technology and Economics (thor.inemi.org/webdownload/newsroom/Presentations/CARTS\_2003.pdf).
- Деспотули А.Л., Андреева А.В., Рамбабу В. Наноионика – основа создания новых приборов для МСТ. Нано- и микросистемная техника. 2005. № 2.
- Despotuli A.L., Nikolaichic V.I. A step towards nanoionics. Solid State Ionics. 1993. V. 60.
- Андреева А.В. Симметрия межкристаллитных границ: приложение к задачам гетероэпитаксии. Поверхность. Физика, химия, механика. 1990. № 46.
- Jiang X., Polastre J., Culler D. Perpetual Environmentally Powered Sensor Networks. Proc. of the Fourth Int. Conf. on Information Processing in Sensor Networks: Special track on Platform Tools and Design Methods for Network Embedded Sensors (IPSN/SPOTS). Los Angeles. April 25–27, 2005 (www.cs.berkeley.edu/~kwright/nest\_papers/spots05-prometheus.pdf).
- Yongping Xia. Supercapacitor boosts current from small battery (www.alcom.be/DATASHEET/Dec%20CETimes.pdf).
- Grantham C.B. Memory-termination IC balances charges (www.edn.com/filtered/pdfs/contents/images/081805di.pdf).
- Belousov A. Single capacitor powers audio mixer (www.edn.com/archives/1997/031497/06DI\_04.htm).
- www.national.com/appinfo/microsmd/ad218.html.