

## Через столетие после открытия: сегнетоэлектрики как основа нового поколения отечественных систем обработки и передачи информации

**К. А. Воротилов<sup>1</sup>, В. М. Мухортов<sup>2</sup>, А. Э. Рассадин<sup>3</sup>, А. С. Сигов<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>доктор технических наук, профессор кафедры физики конденсированного состояния, Московский технологический университет. Россия, г. Москва. E-mail: vorotilov@mirea.ru

<sup>2</sup>доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией физики тонких сегнетоэлектрических пленок отдела физики и астрономии, Южный научный центр РАН. Россия, г. Ростов-на-Дону. ORCID: 0000-0003-1436-2785. E-mail: mukhortov1944@mail.ru

<sup>3</sup>член Правления, Нижегородское математическое общество.

Россия, г. Нижний Новгород. ORCID: 0000-0001-5644-4012. E-mail: brat\_ras@list.ru

<sup>4</sup>доктор физико-математических наук, академик РАН, Президент, Московский технологический университет. Россия, г. Москва. E-mail: sigov@mirea.ru

**Аннотация.** Представленный обзор посвящен анализу современного состояния развития информационных систем, в которых используются интегрированные сегнетоэлектрические устройства. Описан отечественный опыт разработки сегнетоэлектрических запоминающих устройств. Приведены характеристики ряда электрически перестраиваемых устройств для информационных систем, функционирующих в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин электромагнитных волн, на базе сегнетоэлектрических пленок наноразмерной толщины. Подробно рассмотрены преимущества таких устройств по сравнению с полупроводниковыми и ферритовыми фазовращателями. Обсуждено применение сегнетоэлектрических конденсаторов с отрицательной дифференциальной емкостью в различных радиотехнических устройствах. Подчеркнута совместимость с КМОП-технологией всех трех типов интегрированных сегнетоэлектрических устройств. Произведено сравнение уровня российских исследований этого междисциплинарного научного направления с мировым уровнем. Перечислен комплекс мер по интенсификации развития рассматриваемой области в России. Дан краткий экскурс в историю исследования сегнетоэлектрических явлений, показана ведущая роль отечественных ученых в создании этого раздела физики.

**Ключевые слова:** титанат бария, цирконат-титанат свинца, осаждение атомарных слоев, теория Гинзбурга – Ландау – Девоншира, фазированная антенная решетка, нелинейная динамика, математическая технология.

Принятие целым рядом стран – крупных геополитических игроков – парадигмы сетевых боевых действий [3; 24] заставляет отечественное экспертное сообщество пристально изучать современный уровень развития отечественных систем обработки и передачи информации (СОПИ) и перспективы их дальнейшего совершенствования. Требования к СОПИ следующего поколения определяются двумя противоречащими друг другу факторами: стоимость создания и обеспечения работы таких систем должна уменьшаться, а скорость передачи данных в них в ближайшие годы должна возрасти до многих гигабайт в секунду. В рамках решения этой научно-технической проблемы переход к более высоким частотам – от 20 до 90 ГГц – выглядит вполне естественным. Вторым очевидным шагом является объединение наземных и космических СОПИ в единую гиперинформационную систему. Реализация этих процедур требует пересмотра существующих технологий передачи информации и создания принципиально новой элементной базы отечественной радиоэлектроники, а именно потребуются уменьшение массогабаритных характеристик радиоэлектронной аппаратуры и мощности, требуемой для ее работы, в сотни раз при одновременном увеличении емкости каналов связи во столько же раз. Для того чтобы наметить путь к достижению этой цели, необходимо обратиться к анализу генезиса сложившегося к настоящему времени научно-технического уклада в сфере СОПИ.

Современное информационное общество возникло благодаря достижениям в области физики полупроводников. Главным функциональным элементом всей полупроводниковой электроники является р-п переход, обнаруженный О. В. Лосевым на поверхности карбида кремния с помощью зондового метода и детально изученный им еще в начале тридцатых годов прошлого века [9]. Однако масштабные исследования полупроводников начались только после окончания Второй мировой войны, когда Дж. Бардин, В. Браттейн и В. Шокли переоткрыли – вслед за О. В. Лосевым [9] – так называемый транзисторный эффект. К концу 50-х годов XX века были разработаны основные эле-

менты полупроводниковой технологии, и Дж. Килби и Р. Нойс предложили интегральную схему. В 1963-м году Ф. Ванлассом и К. Сахом была предложена концепция комплементарной логики, в 1967-м году Р. Деннард предложил концепцию полупроводниковой памяти, а в 1971 г. компания Intel выпустила первый микропроцессор (см. [5] и ссылки там). С тех пор главной движущей силой развития полупроводниковой промышленности является постоянное повышение степени интеграции (числа элементов на кристалле), реализуемое путем уменьшения минимальных топологических размеров, обеспечиваемых методами литографии [22].

Между тем известно, что закон Мура скоро перестанет действовать из-за атомарной структуры вещества и конечности скорости света, что означает наличие физического предела в развитии КМОП-технологии [22], поэтому в ближайшие годы будут интенсивно развиваться ветви электроники, отличные от полупроводниковой электроники. Для того чтобы понять, в каком направлении пойдет это развитие, нужно вспомнить, что одновременно с исследованием полупроводников началось и исследование сегнетоэлектриков.

Этот важный для приложений класс материалов был открыт ровно сто лет тому назад американским физиком Д. Валашеком [34], обнаружившим петлю гистерезиса у кристалла сегнетовой соли  $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ . В СССР через 10 лет исследования свойств сегнетовой соли по поручению А. Ф. Иоффе продолжил И. В. Курчатов со своими сотрудниками. Итоги этих исследований были подведены в монографии [16]. Далее в 1945-м году Б. М. Вулом и И. М. Гольдманом был открыт титанат бария  $\text{BaTiO}_3$  [8] – родоначальник самого большого в настоящее время класса кислородно-октаэдрических сегнетоэлектриков. В том же году в рамках теории Ландау фазовых переходов второго рода В. Л. Гинзбург развил феноменологическую теорию сегнетоэлектричества [10]. В 50–60-е годы прошлого века параллельно с теоретическим осмыслением физики сегнетоэлектрических явлений начался поиск практических приложений сегнетоэлектриков. Но этот первый этап работ не завершился заметными практическими результатами.

Следующая волна интереса к сегнетоэлектрическим устройствам возникла в 70-е годы XX века вместе с идеей интеграции сегнетоэлектриков с полупроводниковыми технологиями после того, как в работе [35] был предложен и экспериментально реализован элемент памяти на основе транзистора, в котором в качестве подзатворного диэлектрика был использован сегнетоэлектрик. Изменение состояния поляризации сегнетоэлектрика приводило к модуляции поверхностного потенциала полупроводника и, соответственно, к открытию или закрытию проводящего канала МСЭП (металл – сегнетоэлектрик – полупроводник)-транзистора.

Огромный потенциал использования сегнетоэлектриков в полупроводниковых технологиях стал понятен около четверти века тому назад, что привело к появлению нового междисциплинарного направления, объединяющего исследования в области технологии новых материалов, физики сегнетоэлектрических структур и интеграции с процессами микроэлектроники, – «integrated ferroelectrics» [4]. Привлекательность идеи интеграции сегнетоэлектриков с микроэлектронными технологиями обусловлена их уникальными физическими свойствами, что позволяет создавать на их основе новые классы СОПИ.

В статье дан обзор современного состояния интегрированных сегнетоэлектрических устройств (ИСУ), наиболее значимых для отечественной радиоэлектронной промышленности. В части 1 суммирован отечественный опыт разработки сегнетоэлектрических запоминающих устройств. В части 2 в качестве принципиально нового решения в технологии создания электрически-перестраиваемых устройств для СОПИ в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн рассмотрено использование сегнетоэлектрических пленок наноразмерной толщины. В части 3 представлены новейшие теоретические результаты по применению в различных радиотехнических устройствах сегнетоэлектрических конденсаторов с отрицательной дифференциальной емкостью, тесно связанные с последними достижениями нелинейной динамики. В заключении обсуждены направления дальнейшего развития теории ИСУ и технологии их производства для СОПИ.

**1. Сегнетоэлектрические запоминающие устройства отечественной разработки.** Одной из основных областей применения ИСУ для СОПИ является создание сегнетоэлектрических запоминающих устройств (СЗУ, FRAM – ferroelectric random access memory) – энергонезависимых перепрограммируемых запоминающих устройств, состояния логического нуля и единицы в которых обеспечиваются возможностью поляризации сегнетоэлектрика внешним электрическим полем в двух противоположных направлениях [4]. СЗУ характеризуются малым временем (менее нс) и большим числом циклов ( $10^{12} \dots 10^{14}$ ) записи/считывания, длительным временем хранения информации (более 10 лет), а также высокой надежностью хранения информации при воздействии внешних факторов [5; 6].

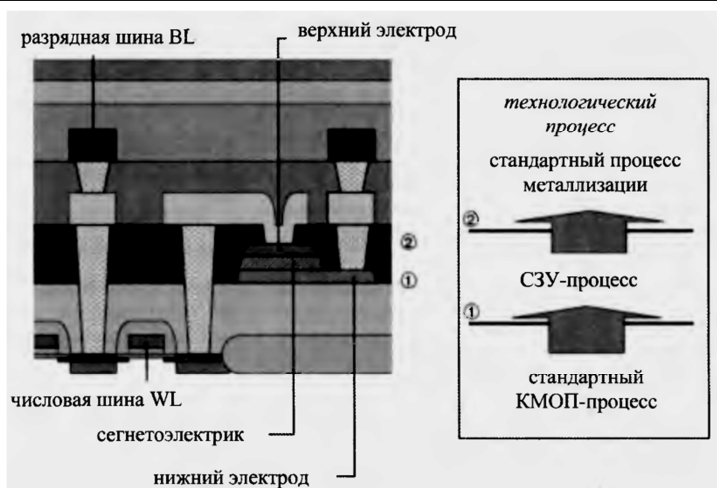


Рис. 1. Поперечное сечение типичной ячейки СЗУ

Для изготовления СЗУ сначала применяется стандартный КМОП-процесс формирования транзисторных структур. После окончания процесса создания изолирующего диэлектрика транзисторных структур делают сегнетоэлектрический конденсатор путем создания нижнего электрода, осаждения сегнетоэлектрического слоя и нанесения верхнего электрода. Затем, когда контакты к обкладкам сегнетоэлектрического конденсатора сформированы, используют стандартный КМОП-процесс создания межуровневой металлизации. Таким образом, процесс создания СЗУ хорошо совместим с стандартной КМОП-технологией. На рис. 1 представлена иллюстрация описанных выше технологических операций, использованных при изготовлении СЗУ.

Очевидно, что важнейшим этапом технологического цикла создания СЗУ является осаждение тонкого слоя сегнетоэлектрика. Существуют следующие методы осаждения: химическое осаждение из растворов (CSD – chemical solution deposition), распыление в вакууме (PVD – physical vapour deposition), химическое осаждение из газовой фазы (CVD – chemical vapour deposition), химическое осаждение из аэрозольных источников (MSCSD – misted source chemical solution deposition), осаждение атомарных слоев (ALD – atomic layer deposition) [4].

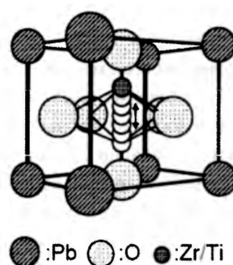


Рис. 2. Кристаллическая структура цирконата-титаната свинца

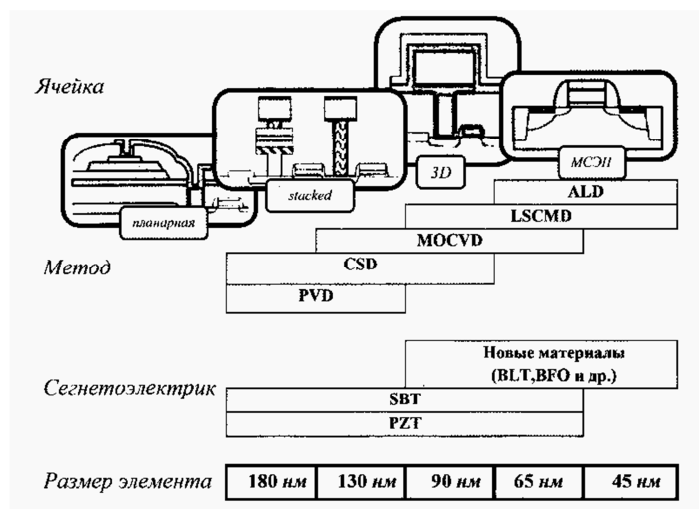


Рис. 3. Существующие и потенциальные решения в области технологий элементов СЗУ

Одним из основных сегнетоэлектрических материалов для применения в СЗУ является цирконат-титанат свинца  $Pb(Zr,Ti)O_3$  (PZT), обладающий высокими ( $10...40$  мкКл/см<sup>2</sup>) значениями остаточной поляризации (см. [4] и ссылки там). PZT имеет структуру перовскита (см. рис. 2) и в зависимости от соотношения Zr/Ti при комнатной температуре может находиться в тетрагональной или ромбоэдрической фазе с температурой фазового перехода в диапазоне  $300...490$  °C. Другой часто используемый при изготовлении СЗУ материал – танталат висмута-стронция  $SrBi_2Ta_2O_9$  (SBT). Он относится к классу слоистых перовскитов, а величина остаточной поляризации в нем значительно ниже, чем в PZT, и составляет в объемных образцах SBT около  $5,5$  мкКл/см<sup>2</sup>, а в пленках  $2...10$  мкКл/см<sup>2</sup>. Поиск сегнетоэлектриков – кандидатов на применение в СЗУ – ведется постоянно. Например, перспективным материалом считается титанат висмута-лантана  $Bi_{3,25}La_{0,75}Ti_3O_{12}$  (BLT), остаточная поляризация в котором около  $12$  мкКл/см<sup>2</sup> (см. [4] и ссылки там).

В России первые образцы СЗУ были созданы в начале 90-х годов прошлого века совместно ОАО «Микрон» и МИРЭА. Были использованы ячейка 6Т/2С и 3 мкм-процесс для создания конденсаторов, формируемых золь-гель методом с использованием уникального электрохимического метода синтеза исходных растворов [2]. Однако в серийное производство разработанные образцы СЗУ не пошли вследствие изменения ситуации в стране. С середины 2000-х годов в связи с реконструкцией отечественных заводов по производству микроэлектроники со стороны изготовителей интегральных схем вновь наметился интерес к СЗУ. Этот интерес имел своим результатом совместную разработку ОАО «Ангстрем» и МИРЭА [7], продемонстрировавшую возможность промышленного производства СЗУ на пластинах диаметром  $200$  мм. В этой разработке был использован процесс «кремний на сапфире», были установлены механизмы кристаллизации слоя PZT при формировании конденсаторных структур элементов СЗУ; при этом удалось сохранить достаточно высокие параметры PZT-слоя (остаточная поляризация  $40$  мкКл/см<sup>2</sup>, коэрцитивное напряжение  $1$  В) [7].

Существующие и потенциальные решения в области технологий элементов СЗУ представлены на рис. 3. Из этого рисунка видно, что в ближайшей перспективе при создании СЗУ будут использоваться структуры типа stacked с постепенным переходом к 3D-элементам. Для формирования сегнетоэлектрических пленок по-прежнему будут использоваться методы CSD и CVD. Однако уменьшение размеров элементов приведет к необходимости использования методов, обеспечивающих лучшую конформность воспроизведения рельефа, таких как MSCSD и ALD. Дальнейшее уменьшение размеров элементов и толщины сегнетоэлектрика приведет к необходимости использования прямого эпитаксиального роста сегнетоэлектрических перовскитов на кремнии и создания транзисторных структур с подзатворным сегнетоэлектриком.

**2. Сегнетоэлектрическая пленка как базовый элемент фазированной антенной решетки нового поколения.** В настоящее время стоимость фазовращательных элементов в фазированной антенной решетке (ФАР) составляет около  $45$  % от стоимости всей ФАР, поэтому создание ФАР нового поколения во многом зависит от решения задачи создания эффективных фазовращателей. Полупроводниковые и ферритовые фазовращатели, применяемые сейчас в большинстве сверхвысокочастотных (СВЧ) систем, обладают целым рядом существенных недостатков, важнейшими из которых являются:

- высокая стоимость;
- большие токи в цепях управления;
- малое быстродействие ферритовых устройств;
- малые рабочие мощности полупроводниковых приборов;
- большие СВЧ-потери на частотах свыше  $10$  ГГц.

Наличие значительных СВЧ-потерь в таких фазовращателях требует применения дополнительных устройств для их компенсации. Причем создание фазовращателя с минимальными потерями позволило бы удалить из конструкции ФАР до  $80$  % активных устройств. Таким образом, полупроводниковые и ферритовые фазовращатели являются сдерживающим фактором при разработке новых ФАР, требующих высокой скорости сканирования, непрерывного кругового обзора и перехода к более высоким рабочим частотам.

Между тем, хорошо известно, что у сегнетоэлектрических устройств:

- стоимость на порядок меньше по сравнению со стоимостью их полупроводниковых и ферритовых аналогов;
- незначительное потребление энергии по цепям управления;
- высокое быстродействие (меньше  $10^{-11}$  с);
- малые СВЧ потери до  $300$  ГГц;
- высокие рабочие мощности.

Кроме того, сегнетоэлектрические устройства обладают еще и рядом дополнительных преимуществ, а именно:

- возможностью перестройки диэлектрической проницаемости под действием внешнего электрического поля;
- высокой радиационной стойкостью ( $5 \cdot 10^{21}$  нейтронов/м<sup>2</sup> с энергиями нейтронов более 0,1 МэВ);
- совместимостью с микрополосковыми линиями;
- высокой надежностью;
- возможностью использования в широком диапазоне частот (0.5 ГГц ÷ 0.4 ТГц).

Все это привело к тому, что в 1998 году Управление перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США (DARPA) открыло 10-летнее финансирование научных исследований по программе FAME (Frequency Agile Materials for Electronics – «Материалы электронной техники с управляемыми параметрами»). Данная программа стимулировала проведение исследований в сотнях университетов США. Далее с 2005 года по настоящее время Европейский Союз проводит исследования по программе «Nanostar», в которой участвуют ведущие научно-исследовательские центры Европы, такие как Chalmers University of Technology, Philips Electronics, Ericsson, Temex Filters, Swiss Federal Institute of Technology и т. д., направленной на исследование наноразмерных сегнетоэлектрических пленок для массового производства управляемых СВЧ-устройств (см. [4] и ссылки там).

Такая целеустремленная научно-техническая политика стран Запада привела к тому, что совместная разработка NASA Glenn Research Center и Neocera Inc. – ФАР высокого разрешения на основе сегнетоэлектрических пленок – вошла в 100 лучших инновационных и технологически существенных мировых разработок 2010 года по рейтингу R&D Magazine [26; 27]. Ее испытания в космосе были проведены в 2011 году, а на производство она была поставлена в 2015 году [26]. Активный диаметр этой ФАР на частоте 29 ГГц составляет 31 см. Система управления располагается на задней стороне и включает 6 слоев для 615 элементов ФАР. В зеркале антенны отсутствуют коммутационные СВЧ тракты. Общее потребление энергии на управление ФАР – не более 22 Вт, т. е. достигнуто уменьшение энергетических затрат на управление антенной в тысячи раз. Интегрально это привело к снижению цены всего изделия в целом по сравнению с существующими аналогами в сотни раз.

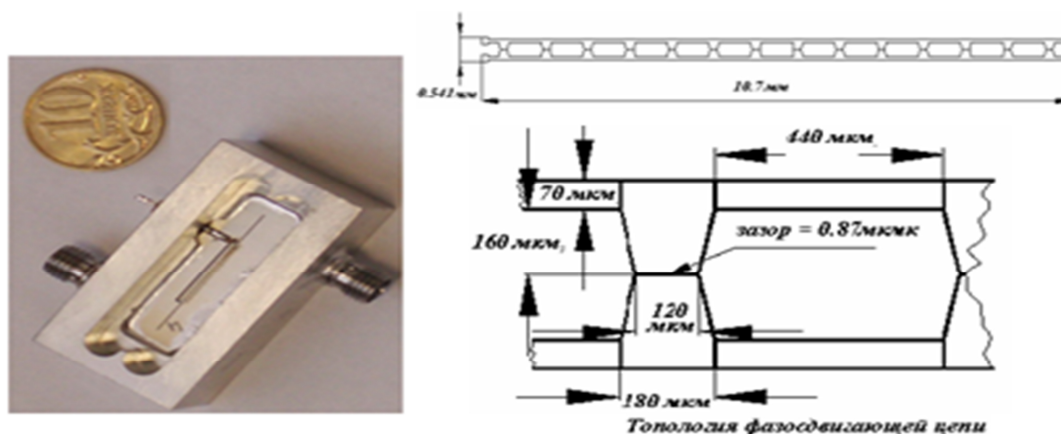


Рис. 4. Внешний вид (слева) и топология фазосдвигающей цепи (справа) фазовращателя на основе наноразмерных сегнетоэлектрических пленок BST

Разработка технологии выращивания гетероструктур сегнетоэлектрик (титанат бария-стронция  $(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$  (BST)) – диэлектрик (оксид магния  $\text{MgO}$ ) для этой ФАР была осуществлена фирмой Neocera Inc [27]. Однако практически одновременно с Neocera Inc аналогичную технологию создала Лаборатория физики тонких сегнетоэлектрических пленок Южного научного центра РАН (ЛФТСЭП ЮНЦ РАН), причем оказалось, что предложенный в России способ создания гетероструктур сегнетоэлектрик-диэлектрик [19], реализованный в установке «Плазма 50СЭ», дает более высокое структурное совершенство сегнетоэлектрических пленок, чем существующие в мире его аналоги [11; 20]. Более того, это привело к тому, что применение выращенных на этой установке сегнетоэлектрических пленок в перестраиваемых СВЧ-устройствах отечественной разработки [18; 21] показало заметное преимущество этих последних над имеющимися зарубежными эквивалентами. Например, на рис. 4 показан монолитный фазовращатель на щелевой линии передачи, периодически нагруженной сегнетоэлектрическими варакторами на основе наноразмерных пленок BST, реализованный в ЛФТСЭП ЮНЦ РАН, для которого установлено, что при уменьшении толщины пленки

BST от 36 до 18 нм коэффициент качества фазовращателя в полосе частот от 12 до 13,5 ГГц возрастает более чем в два раза [18].

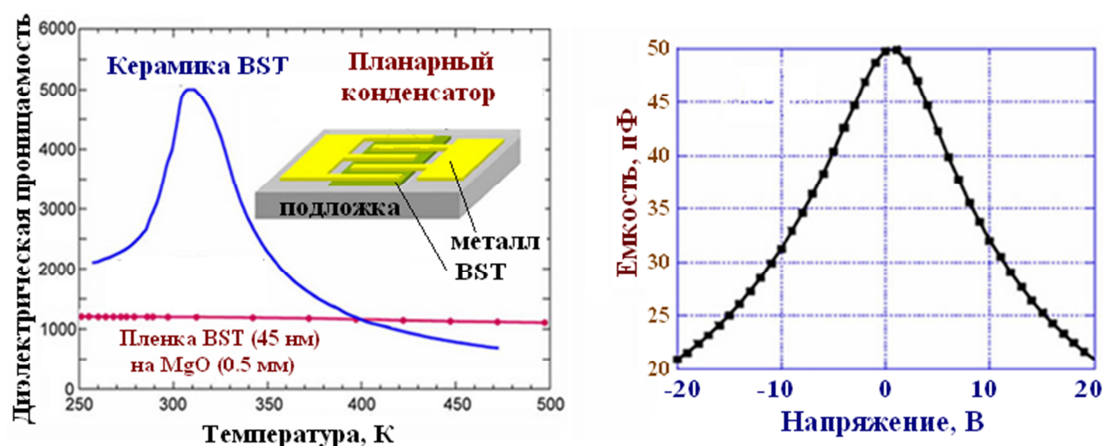


Рис. 5. Характеристики BST-варактора

В настоящее время в ЛФТСЭП ЮНЦ РАН исследования пленок BST продолжают. В частности, методами терагерцовой ЛОВ – спектроскопии (ЛОВ – лампа обратной волны), инфракрасной Фурье-спектроскопии и дисперсионного анализа показано [13], что основной вклад в диэлектрическую проницаемость тонких пленок BST, осажденных на подложки монокристаллического MgO, обусловлен LO-TO расщеплением мягкой моды в поле макроскопической поляризации, на частотах ТГц диапазона. Это означает, что гетероструктуры BST/MgO можно использовать в СВЧ-устройствах вплоть до частот 500 ГГц, не опасаясь влияния дисперсии.

На рис. 5 представлены характеристики созданного в ЛФТСЭП ЮНЦ РАН BST-варактора, демонстрирующего возможность электронного управления диэлектрической проницаемостью при управляющем напряжении меньше 20 В при токе  $\sim 10^{-9}$  А, что на несколько порядков меньше по сравнению с ферритовыми управляющими устройствами или устройствами на основе полупроводников. Таким образом, планарная технология создания волноведущих структур открывает возможность создания на основе тонких пленок BST производства ЛФТСЭП ЮНЦ РАН целого класса электронно-перестраиваемых устройств для СОПИ – не только фазовращателей, но и перестраиваемых фильтров, линий задержки, резонаторов, оптических модуляторов, параметрических усилителей, которые хорошо вписываются в уже развитую технологию СВЧ-интегральных схем.

**3. Наногетероструктура «сегнетоэлектрик – диэлектрик» как конденсатор с отрицательной дифференциальной емкостью.** Возможности СОПИ, применяющих линейки электрически-перестраиваемых СВЧ-устройств на основе пленок BST, можно существенно расширить и дополнить за счет применения сегнетоэлектрических устройств с отрицательной дифференциальной емкостью. Впервые экспериментальное наблюдение при комнатной температуре термодинамически устойчивого эффекта отрицательной емкости двуслойного конденсатора, состоящего из сегнетоэлектрика – PZT состава  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0,2}\text{Ti}_{0,8})\text{O}_3$  – и нелинейного диэлектрика – титаната стронция  $\text{SrTiO}_3$ , было описано в статье [28]. Мы будем называть такие двуслойные системы «сегнетоэлектрик-диэлектрик» с отрицательной емкостью NC-конденсаторами. Напряжение на NC-конденсаторе связано с зарядом  $Q$  на его обкладках выражением:

$$V = -\alpha \cdot Q + \beta \cdot Q^3. \quad (1)$$

Параметры  $\alpha$  и  $\beta$ , входящие в формулу (1), считаются положительными и зависят как от свойств материалов, образующих пару «сегнетоэлектрик-диэлектрик», так и от геометрии NC-конденсатора.

Рассмотрим, следуя [28], феноменологическую теорию плоского NC-конденсатора (см. рис. 6).

В рамках теории Гинзбурга-Ландау-Девоншира [10] термодинамический потенциал  $\tilde{\Phi}$  этой двуслойной системы из сегнетоэлектрика и диэлектрика, отнесенный к единице площади конденсатора  $A$ , есть просто сумма термодинамических потенциалов ее составных частей:

$$\frac{\tilde{\Phi}}{A} = l_f \cdot \left( \frac{\alpha_f \cdot P_f^2}{2} + \frac{B_f \cdot P_f^4}{4} \right) + l_d \cdot \left( \frac{\alpha_d \cdot P_d^2}{2} + \frac{B_d \cdot P_d^4}{4} \right) - l_f \cdot E_f \cdot P_f - l_d \cdot E_d \cdot P_d, \quad (2)$$

где  $l_f$  и  $l_d$  – толщины сегнетоэлектрика и диэлектрика соответственно,  $\alpha_f, B_f$  и  $\alpha_d, B_d$  – константы анизотропии рассматриваемых материалов,  $E_f$  и  $E_d$  – напряженности электрического поля внутри сегнетоэлектрика и диэлектрика соответственно, а  $P_f$  и  $P_d$  – поляризация сегнетоэлектрика и диэлектрика.

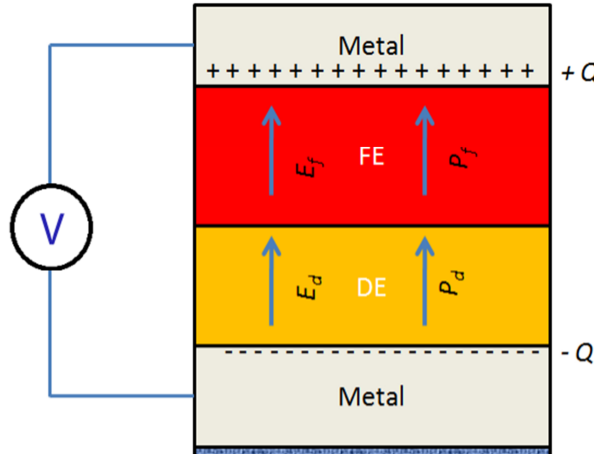


Рис. 6. Конденсатор, заполненный сегнетоэлектриком и нелинейным диэлектриком, с приложенным к нему напряжением  $V$

Формулу (2) необходимо дополнить 2-м законом Кирхгофа и условием непрерывности вектора электрической индукции на границе раздела между сегнетоэлектриком и диэлектриком:

$$E_f \cdot l_f + E_d \cdot l_d = V \quad \varepsilon_0 \cdot E_f + P_f = \varepsilon_0 \cdot E_d + P_d. \quad (3)$$

Выражая из системы линейных уравнений (3) напряженности электрических полей в обеих средах и подставляя их в формулу (2), найдем:

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{\Phi}}{A} = & l_f \cdot \left( \frac{\alpha_f \cdot P_f^2}{2} + \frac{B_f \cdot P_f^4}{4} \right) + l_d \cdot \left( \frac{\alpha_d \cdot P_d^2}{2} + \frac{B_d \cdot P_d^4}{4} \right) \\ & - V \cdot \frac{P_f \cdot l_f + P_d \cdot l_d}{l_f + l_d} + \frac{l_f \cdot l_d \cdot (P_f - P_d)^2}{\varepsilon_0 \cdot (l_f + l_d)}. \end{aligned} \quad (4)$$

В целом ряде статей (см. [28] и ссылки там) показано, что для двуслойной системы «сегнетоэлектрик – диэлектрик» энергетически выгодно выравнивание значений поляризации в слоях, поэтому, подставив в формулу (4)  $P_f = P_d = P$ , получим:

$$\frac{\tilde{\Phi}}{A} = \frac{\alpha_f \cdot l_f + \alpha_d \cdot l_d}{2} \cdot P^2 + \frac{B_f \cdot l_f + B_d \cdot l_d}{4} \cdot P^4 - V \cdot P. \quad (5)$$

Дифференцируя выражение (5) по общей для обоих слоев поляризации  $P$ , подставляя в него  $P = Q/A$ , где  $Q$  – заряд конденсатора, и затем, приравнявая результат нулю, найдем нелинейную связь между напряжением  $V$  на конденсаторе на рис. 6. и зарядом на нем. Если температура среды  $T$ , температура Кюри сегнетоэлектрика  $T_f$  и температура Кюри диэлектрика  $T_d$  удовлетворяют условию  $T_d < T < T_f$ , то, в силу обычных соотношений [10]  $\alpha_f = a_f \cdot (T - T_f)$  и  $\alpha_d = a_d \cdot (T - T_d)$ , коэффициенты Ландау в которых положительны:  $a_f > 0$  и  $a_d > 0$ , получим, что необходимое для существования отрицательной дифференциальной емкости распределение знаков коэффициентов перед степенями заряда в уравнении (1) вполне может быть выполнено.

Рассмотрим теперь обычный колебательный контур с индуктивностью  $L$ , в котором, однако, вместо конденсатора с положительной емкостью включен NC-конденсатор (см. рис. 7). Заряд  $Q$  на NC-конденсаторе подчиняется обыкновенному дифференциальному уравнению [29]:

$$L \cdot \frac{d^2 Q}{dt^2} - \alpha \cdot Q + \beta \cdot Q^3 = 0. \tag{6}$$

Уравнение (6) является известным уравнением Дюффинга с гомоклинической восьмеркой (см. [14] и ссылки там, а также его фазовый портрет на рис. 7). Свойства его решений зависят от значения безразмерной энергии в контуре [29]:

$$h = \frac{H}{\alpha^2/\beta}, \tag{7}$$

где  $H = \frac{L \cdot I_0^2}{2} - \frac{\alpha \cdot q_0^2}{2} + \frac{\beta \cdot q_0^4}{4}$  – полная энергия в контуре, сохраняющаяся в силу уравнения (6),  $Q_0$  – заряд на NC-конденсаторе и  $I_0$  – ток через индуктивность в начальный момент времени.

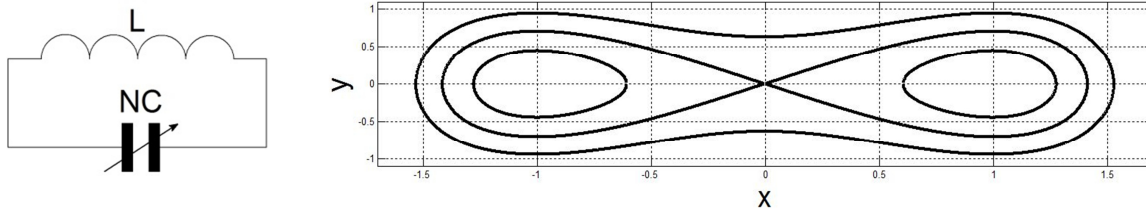


Рис. 7. Колебательный контур с NC-конденсатором: электрическая схема (слева) и фазовый портрет (справа)

Точное решение уравнения (6) выражается через эллиптические функции Якоби [29]:

$$Q(t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \cdot A \cdot \operatorname{dn} \left[ \frac{A}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{L}} \cdot t, k_1 \right], & -\frac{1}{4} < h < 0 \\ \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \cdot A \cdot \operatorname{cn} \left[ \sqrt{A^2 - 1} \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{L}} \cdot t, k_2 \right], & h > 0 \end{cases}, \tag{8}$$

где  $A = \sqrt{1 + \sqrt{1 + 4 \cdot h}}$ ,  $k_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot \sqrt{1 + 4 \cdot h}}{1 + \sqrt{1 + 4 \cdot h}}}$  и  $k_2 = \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 + 4 \cdot h}}{2 \cdot \sqrt{1 + 4 \cdot h}}}$ .

Период нелинейных колебаний заряда в контуре равен [29]:

$$T(h) = \begin{cases} \sqrt{\frac{L}{\alpha}} \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{A(h)} \cdot K(k_1(h)), & -\frac{1}{4} \leq h < 0 \\ \sqrt{\frac{L}{\alpha}} \cdot \frac{4}{\sqrt{A^2(h) - 1}} \cdot K(k_2(h)), & h > 0 \end{cases}, \tag{9}$$

где  $K(k)$  – полный эллиптический интеграл 1-го рода.

В экспериментах с образцом  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0,2}\text{Ti}_{0,8})\text{O}_3$  толщиной 28 нм на  $\text{SrTiO}_3$  толщиной 48 нм площадью  $A = 30 \text{ мкм} \times 30 \text{ мкм}$ , описанных в [28], оказалось, что  $\alpha \sim 10^{10} \text{ В/Кл}$  и  $\beta \sim 0,5 \cdot 10^{29} \text{ В Кл}^3$ . Таким образом, характерные масштабы электрического заряда на NC-конденсаторе, напряжения на нем и энергии в контуре равны  $\sqrt{\alpha/\beta} \sim 0,5 \text{ нКл}$ ,  $\alpha^{3/2}/\beta^{1/2} \sim 5 \text{ В}$  и  $\alpha^2/\beta \sim 1 \text{ нДж}$  соответственно.

Из формул (8) и (9) видно, что, как и должно быть для нелинейной системы, период колебаний в контуре зависит от энергии, сосредоточенной в нем, а решение уравнения (6) обогащено гармониками. Это указывает на возможные нетривиальные технические применения такого контура, в частности, из напряжения на NC-конденсаторе с помощью спроектированного с использованием формулы (9) фильтра нижних частот можно извлечь низшую гармонику, с помощью полосно-пропускающего фильтра – гармонику с частотой  $n/T(h)$  ( $n \in \mathbb{N}$ ), а с помощью частотно-раз-



делительных устройств [1] – дуплексеров, триплексеров и т. д. – две, три и т. д. гармоники соответственно, причем все эти устройства могут быть размещены на одной интегральной схеме.

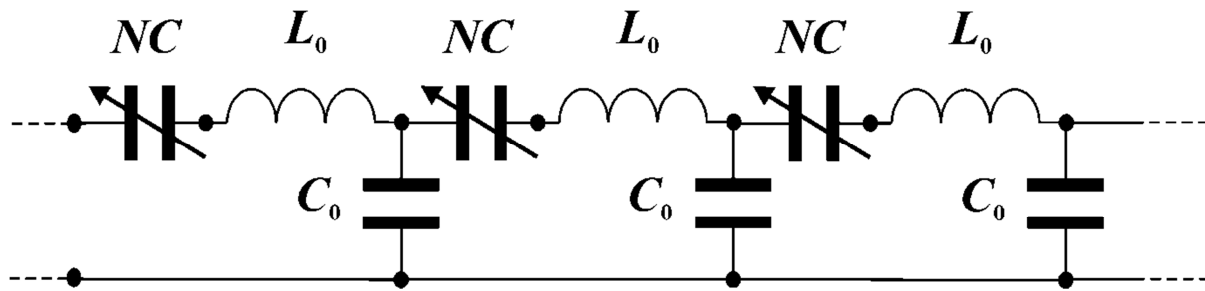


Рис. 8. Электрическая схема однородной цепочки с NC-конденсаторами

Из колебательного контура с NC-конденсатором можно составить более сложные электрические схемы, например, однородную цепочку (рис. 8). Благодаря тому что полученные экспериментально NC-конденсаторы имеют характерный размер  $\sim 100$  нм [28], при достаточно большом числе элементарных четырехполюсников в такой цепочке ее с хорошей степенью точности можно описать в непрерывном пределе – как длинную линию, введя электрический заряд  $Q(z, t)$  на NC-конденсаторе этой линии в точке  $z$  в момент времени  $t$  [15]. В этом случае по цепочке могут распространяться бегущие волны заряда, которые получают из формул (8) заменой:

$$\sqrt{\frac{\alpha}{L}} \cdot t \rightarrow \frac{k \cdot z - \omega \cdot t}{\sqrt{\omega^2 \cdot L_0 \cdot C_0 - k^2}},$$

где  $L_0$  и  $C_0$  – погонные индуктивность и емкость этой линии соответственно [15], а с помощью формулы (9) будет определяться длина волны. Более того, в рамках теории модуляции Уизема можно рассмотреть распространение волн такого типа и при неоднородной начальной плотности энергии в линии [15].

ответственно [15], а с помощью формулы (9) будет определяться длина волны. Более того, в рамках теории модуляции Уизема можно рассмотреть распространение волн такого типа и при неоднородной начальной плотности энергии в линии [15].

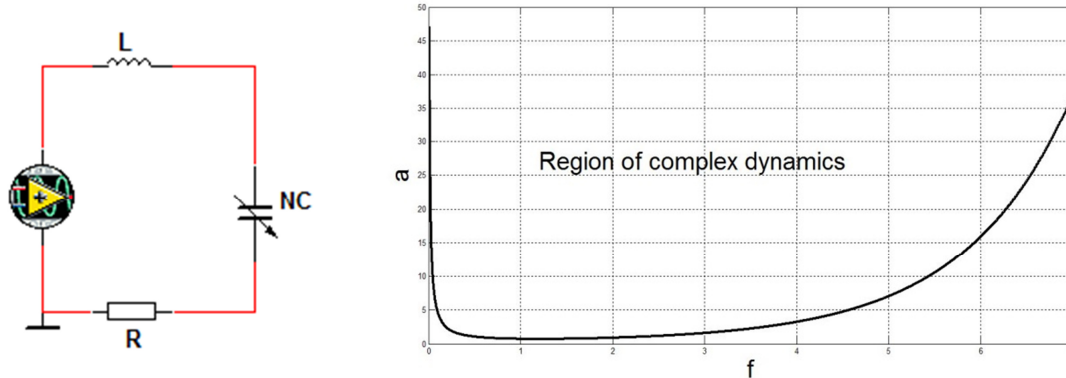


Рис. 9. Колебательный контур с NC-конденсатором и сопротивлением под воздействием гармонического внешнего напряжения: электрическая схема (слева) и область сложной динамики в пространстве его параметров (справа)

Далее, наличие на фазовом портрете колебательного контура на рис. 7 гомоклинических петель указывает на еще один вариант содержательного обобщения этой схемы [31]. Оно состоит в учете сопротивления индуктивности контура и подаче внешнего гармонического напряжения (см. рис. 9). Тогда дифференциальное уравнение для безразмерного заряда  $x$  NC-конденсатора имеет вид:

$$\ddot{x} - x + x^3 = -\gamma \cdot \dot{x} + \beta \cdot \cos \Omega t, \tag{10}$$

где точка означает дифференцирование по безразмерному времени, а смысл остальных безразмерных параметров очевиден. Хорошо известно [17], что для уравнения (10) имеется область параметров (рис. 9), в которой его решение демонстрирует свойство детерминированного хаоса. Это означает, что схема на рис. 9 может быть применена в качестве генератора хаоса в прямохаотических системах передачи информации [31].

Гармонический сигнал необходимой частоты и амплитуды в этом случае может быть получен пропусканием через фильтр нижних частот выходного сигнала от генератора Ван-дер-Поля на полевом транзисторе (см. рис. 10), который описывается уравнением:

$$\ddot{x} + x = \varepsilon \cdot (1 - x^2) \cdot \dot{x}, \quad 0 < \varepsilon \ll 1. \quad (11)$$

Все эти схемы – генератор Ван-дер-Поля, фильтр и колебательный контур с НС-конденсатором – могут быть размещены на одной микросхеме. Очевидно, что эта система совместима с КМОП-технологией.

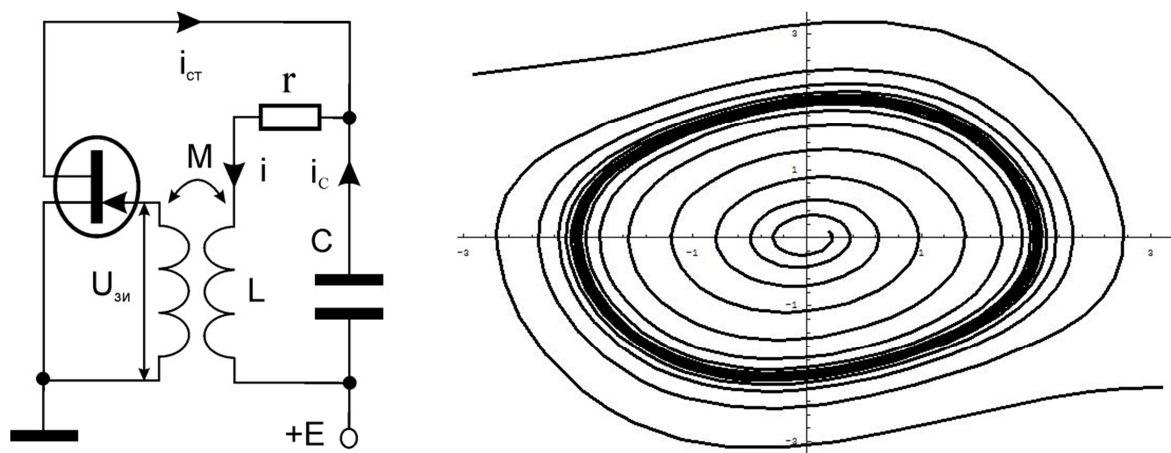


Рис. 10. Генератор Ван-дер-Поля на полевом транзисторе: электрическая схема (слева) и фазовый портрет (справа)

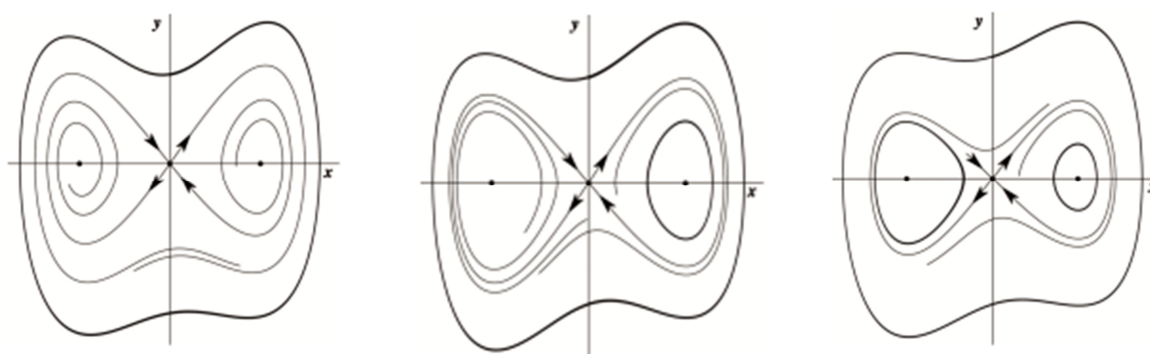


Рис. 11. Фазовые портреты уравнения Дюффинга-Ван-дер-Поля

Наконец, схема на рис. 10 подсказывает еще одно обобщение [30]: замену в колебательном контуре генератора Ван-дер-Поля обычного конденсатора на НС-конденсатор. Функционирование такого устройства описывается уравнением Дюффинга-Ван-дер-Поля с гомоклинической восьмеркой:

$$\ddot{x} - x + x^3 = \varepsilon \cdot (p_1 + p_2 \cdot x - x^2) \cdot \dot{x}, \quad 0 < \varepsilon \ll 1, \quad (12)$$

подробно исследованным в работе [14]. Там, в частности, доказано, что в зависимости от значений параметров  $p_1$  и  $p_2$  при достаточно малых  $\varepsilon$  уравнение (12) может иметь от одного до трех предельных циклов. Примеры таких циклов представлены на рис. 11.

Таким образом, уравнение (12) имеет по сравнению с уравнением Ван-дер-Поля (11), фазовый портрет которого представлен на рис. 10, гораздо более сложную систему аттракторов и репеллеров, что весьма интересно для приложений. Отметим, что генератор на полевом транзисторе с НС-конденсатором в колебательном контуре совместим с КМОП-технологией.

**Заключение.** В настоящее время экспериментальные и теоретические исследования по ИСУ в России требуют самого пристального внимания, поскольку ИСУ указывают новые возможности построения элементной базы отечественной радиоэлектроники, что, в свою очередь, чрезвычайно актуально для создания конкурентоспособных отечественных производств СОПИ. Поэтому в целях вывода на 1-е место в мире освещенных в представленном обзоре направлений развития российских ИСУ можно дать следующие рекомендации:

– для организации производства в России СЗУ высокой степени интеграции с 3D-архитектурой конденсаторных элементов в нашей стране необходима постановка исследований по методу осаждения атомных слоев (ALD);

– к необходимости разработки электрически перестраиваемых систем на основе тонких сегнетоэлектрических пленок надо привлечь внимание крупных потребителей отечественной элементной базы отечественной радиоэлектроники, таких как АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей», АО «Концерн Радиостроения «Вега», АО «Концерн «Созвездие» и т. д., в том числе с использованием потенциала научно-образовательных центров и базовых кафедр опорных вузов этих последних;

– необходима постановка исследований по созданию отечественных сегнетоэлектрических конденсаторов с отрицательной дифференциальной емкостью, в том числе по подбору пар материалов сегнетоэлектрик-диэлектрик в рамках концепции работы с big data в рассматриваемой предметной области, т. е. обработке изображений образцов сегнетоэлектрических материалов по данным сканирующей зондовой микроскопии, нейтронографии и т. д. самыми современными методами [23] одновременно с использованием новейших теоретических достижений в физике сегнетоэлектриков [12].

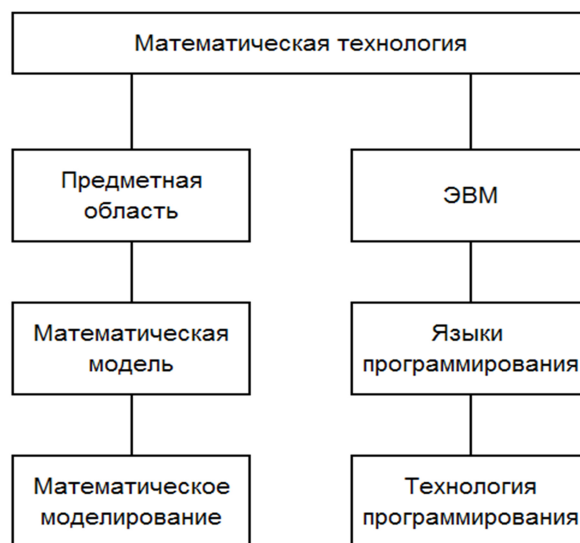


Рис. 12. Структура концепции «математическая технология»

Важным условием успешного вхождения российских электронных предприятий на рынок ИСУ является наличие у них систем автоматизированного проектирования (САПР) ИСУ, полностью открытых для отечественного пользователя. Это означает не только необходимость разработки продвинутых математических моделей ИСУ, но и необходимость замены импортных пакетов САПР Mentor Graphics, Cadence, Synopsys, Tanner EDA, применяемых на отечественных предприятиях для проектирования различных устройств по КМОП-технологии, на отечественные пакеты того же назначения. Наконец, необходимы САПР по моделированию методов осаждения тонкого слоя сегнетоэлектрика – CSD, PVD, CVD, MSCSD, ALD, причем они должны включать в себя не только собственно моделирование, но и оптимизацию результата моделирования в соответствии с заданными исследователем критериями качества [32].

Сказанное выше означает необходимость возврата на качественно новом уровне к концепции математической технологии (рис. 12), объединяющей две иерархические цепочки: первая цепочка включает в себя предметную область, математические модели и математическое моделирование; вторая цепочка состоит из ЭВМ, языков программирования и технологии программирования. Само понятие «математическая технология» возникло в СССР в начале 70-х годов прошлого века в работах А. А. Самарского, Н. Н. Яненко, К. И. Бабенко, А. Н. Панченкова и др. как научное направление, связанное с разработкой и функционированием программных систем поддержки процессов принятия решений, в том числе с применением суперкомпьютеров (подробнее см. [25; 33] и ссылки там). Процедура создания математической технологии для разработки отечественных ИСУ должна быть оформлена как научно-техническая программа, в которую вполне допустимо привлечение инвестиций от геополитических партнеров России в Евразии.

### Список литературы

1. Бугров В. Н., Рассадин А. Э. Параметрический синтез МЧРУ в программной среде «ЛИПС 4.0» с поддержкой проектирования СКМ «Mathematica 5.0» // Труды XIV межрегиональной научно-технической конференции «Обработка сигналов в системах наземной радиосвязи и оповещения» // под ред. М. Д. Венедиктова и А. Э. Рассадина. Н. Новгород : Поволжье, 2006. С. 53–56.

2. Интегрированные сегнетоэлектрические устройства / А. С. Валеев, В. Н. Дягилев, А. А. Львович [и др.] // *Электронная промышленность*. 1994. Вып. 6. С. 75–79.
3. *Верба В. С.* Проблемы и общесистемные вопросы разработки бортовых РЛС нового поколения // *Журнал радиоэлектроники*. 2016. № 1. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan16/11/text.pdf>. 29 с.
4. *Воротилов К. А., Мухортов В. М., Сигов А. С.* Интегрированные сегнетоэлектрические устройства / под ред. А. С. Сигова. М.: Энергоатомиздат, 2011. 175 с.: ил.
5. *Воротилов К. А., Сигов А. С.* Сегнетоэлектрические запоминающие устройства // *Физика твердого тела*. 2012. Т. 54. Вып. 5. С. 843–848.
6. *Воротилов К. А., Сигов А. С.* Сегнетоэлектрические запоминающие устройства: перспективные технологии и материалы // *Нано- и микросистемная техника*. 2008. № 10. С. 30–42.
7. Формирование сегнетоэлектрических наноструктур для нового поколения устройств микро- и наноэлектроники / К. А. Воротилов, А. С. Сигов, А. А. Романов, П. Р. Машевич // *Наноматериалы и наноструктуры – XXI век*. 2010. № 1. С. 45–53.
8. *Вул Б. М., Гольдман И. М.* Диэлектрическая проницаемость титанатов металлов второй группы // *Доклады Академии наук СССР*. 1945. Т. 46. № 3. С. 154–157.
9. О. В. Лосев и пути развития русской микроэлектроники в XXI в. / С. А. Гилев, М. А. Новиков, А. А. Потапов, А. Э. Рассадин // *Нелинейный мир*. 2015. № 4. С. 4–11.
10. *Гинзбург В. Л.* О диэлектрических свойствах сегнетоэлектриков и титаната бария // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 1945. Т. 15. Вып. 12. С. 739–750.
11. Электронная микроскопия высокого разрешения гетероэпитаксиальных пленок титаната бария-стронция на подложках MgO / О. М. Жигалина, А. Н. Кускова, А. Л. Чувилин [и др.] // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2009. № 7. С. 55–61.
12. *Ивлиев М. П., Сахненко В. П.* Орбитальные упорядочения и повороты октаэдров как основа формирования высокотемпературной структуры перовскитов с ян-теллеровскими катионами // *Сборник трудов X Научно-практического семинара «Актуальные проблемы физики конденсированных сред. К 110-летию Х. И. Амирханова» (Махачкала, 6–9 июня 2017 г.)*. Махачкала, 2017. С. 8–24.
13. Диэлектрический отклик тонких пленок (Ba,Sr)TiO<sub>3</sub> в терагерцевом и ИК-диапазонах / Г. А. Командин, В. М. Мухортов, О. Е. Породинков, И. Е. Спектор // *Физика твердого тела*. 2013. Т. 55. Вып. 2. С. 252–256.
14. *Костромина О. С.* К теории уравнений типа Дюффинга с «гомеклинической восьмеркой» // *дис. ... к. ф.-м. н. Н. Новгород: ННГУ им. Н. И. Лобачевского*, 2016. 137 с. URL: <https://diss.unn.ru/616>.
15. Колебания в однородной цепочке с сегнетоэлектрическими конденсаторами с отрицательной емкостью / О. С. Костромина, А. А. Потапов, И. В. Ракуть, А. Э. Рассадин // *Ученые записки физического факультета МГУ*. 2017. № 6. С. 1760703-1-6.
16. *Курчатов И. В.* Сегнетоэлектрики. Л.; М.: ГТТИ, 1933. 104 с.
17. *Мельников В. К.* Об устойчивости центра при периодических по времени возмущениях // *Труды Московского математического общества*. 1963. Т. 12. С. 3–52.
18. Фазовращатель на щелевой линии, нагруженной варакторами на основе наноразмерных пленок титаната бария-стронция / Вас. М. Мухортов, С. И. Масычев, А. В. Чуб [и др.] // *Радиотехника и электроника*. 2007. Т. 52. № 11. С. 1402–1406.
19. Гетероэпитаксиальный рост пленок сложного оксида из самоорганизованной системы, образующейся в плазме газового разряда / В. М. Мухортов, Ю. И. Головкин, Г. Н. Толмачев, А. И. Мащенко // *Журнал технической физики*. 1999. Т. 69. Вып. 12. С. 87–91.
20. Внутренние напряжения и деформационный фазовый переход в наноразмерных пленках титаната бария-стронция / В. М. Мухортов, Ю. И. Головкин, Ю. И. Юзюк [и др.] // *Кристаллография*. 2008. Т. 53. № 3. С. 536–543.
21. Применение наноразмерных пленок титаната бария-стронция для перестраиваемых сверхвысокочастотных устройств / В. М. Мухортов, С. И. Масычев, Ю. И. Головкин, А. В. Чуб // *Журнал технической физики*. 2006. Т. 76. Вып. 10. С. 106–109.
22. *Попов В. Г.* Эффект резонансного туннелирования носителей и его использование в транзисторах // *Труды 1-й Российско-белорусской научно-технической конференции «Элементная база отечественной радиоэлектроники», посвященной 110-ю со дня рождения О. В. Лосева: в 2-х т. Т. 2 / под ред. А. Э. Рассадина. Н. Новгород: Нижегородская радиолaborатория*. 2013. С. 7–10.
23. Новейшие методы обработки изображений / А. А. Потапов, Ю. В. Гуляев, С. А. Никитов [и др.]; под ред. А. А. Потапова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 496 с.: ил.
24. *Рассадин А. Э.* Радиолокационные станции с синтезированием апертуры антенны // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. 2009. Т. 9. № 4. С. 239–241.
25. *Рассадин А. Э.* Концептуальное проектирование радиолокационной станции с синтезированием апертуры антенны (РСА) на воздушном носителе «из первых принципов» // *Журнал радиоэлектроники*. 2012. № 1. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan12/2/text.pdf>. 35 с.
26. Сайт NASA Glenn Research Center. URL: <https://www.nasa.gov/centers/glenn/home/index.html>.
27. Сайт Neocera Inc. URL: <http://neocera.com>.
28. Experimental evidence of ferroelectric negative capacitance in nanoscale heterostructures / A. I. Khan, D. Bhowmik, P. Yu [et al.] // *Applied Physics Letters*. 2011. V. 99. Pp. 113501-1-10.
29. Total harmonic distortions in oscillatory circuit with a ferroelectric capacitor with a negative capacitance / O. S. Kostromina, A. A. Potapov, I. V. Rakut, A. E. Rassadin // *Eurasian Physical Technical Journal*. 2017. V. 14. № 2 (28). Pp. 14–21.

30. Kostromina O. S., Rakut I. V., Rassadin A. E. On the possibility of experimental observation of one case of "the 16<sup>th</sup> weakened Hilbert problem" // International conference 'Shilnikov WorkShop-2016', dedicated to the memory of Leonid Pavlovich Shilnikov (1934–2011) (Nizhny Novgorod, Russia, December 16–17, 2016). Book of abstracts. Pp. 10–11. URL: <http://www.shilnikov.unn.ru/doc/123allShWsh2016fin.pdf>.

31. Potapov A. A., Rassadin A. E., Tronov A. A. Generators of Chaotic Electrical Oscillations on Basis of Ferroelectric Capacitor with a Negative Capacitance // Proc. 14<sup>th</sup> Sino – Russia Symposium on Advanced Materials and Technologies / Ed. Mingxing Jia (Sanya, Hainan Province, China: November 28 – December 1, 2017). Beijing : Metallurgical Industry Press (China, <http://www.cnmp.com.cn>). 2017. Pp. 487–490.

32. Some notes about scanning probe microscopy, nanoengineering and methods of quantum mechanics / A. E. Rassadin, T. S. Sazanova, A. V. Stepanov, L. A. Fomin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. V. 443. № 1. Pp. 012027-1-13.

33. Rassadin A. E., Stepanov A. V. Mathematical technology for solving the Kardar-Parizi-Zhang equation with a source // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1392. Pp. 012059-1-6.

34. Valasek J. Piezoelectric and allied phenomena in Rochelle salt // Physical Review. 1920. V. 15. № 6. Pp. 537–538; 1921. V. 17. № 4. Pp. 475–481.

35. Wu S. Y. A new ferroelectric memory device, metal-ferroelectric-semiconductor transistor // IEEE Transactions on Electron Devices. 1974. V. ED-21. № 8. Pp. 499–512.

## A century after the discovery: ferroelectrics as the basis of a new generation of domestic information processing and transmission systems

**K. A. Vorotilov<sup>1</sup>, V. M. Mukhortov<sup>2</sup>, A. E. Rassadin<sup>3</sup>, A. S. Sigov<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Condensed Matter Physics,  
Moscow Technological University. Russia, Moscow. E-mail: vorotilov@mirea.ru

<sup>2</sup>Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory of Physics of Thin Ferroelectric Films,  
Department of Physics and Astronomy, Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.  
Russia, Rostov-on-Don. ORCID: 0000-0003-1436-2785. E-mail: mukhortov1944@mail.ru

<sup>3</sup>member of the Board, Nizhny Novgorod Mathematical Society.

Russia, Nizhny Novgorod. ORCID: 0000-0001-5644-4012. E-mail: brat\_ras@list.ru

<sup>4</sup>Doctor of Physical and Mathematical Sciences, academician of the Russian Academy of Sciences, president,  
Moscow Technological University. Russia, Moscow. E-mail: sigov@mirea.ru

**Abstract.** The presented review is devoted to the analysis of the current state of development of information systems that use integrated ferroelectric devices. The article describes the domestic experience in the development of ferroelectric storage devices. The characteristics of a number of electrically tunable devices for information systems operating in the millimeter and submillimeter ranges of electromagnetic wavelengths, based on ferroelectric films of nanoscale thickness, are presented. The advantages of such devices in comparison with semiconductor and ferrite phase shifters are considered in detail. The use of ferroelectric capacitors with negative differential capacitance in various radio engineering devices is discussed. The compatibility with CMOS technology of all three types of integrated ferroelectric devices is emphasized. The level of Russian research in this interdisciplinary scientific field is compared with the world level. A set of measures to intensify the development of this area in Russia is listed. A brief overview of the history of the study of ferroelectric phenomena is given, and the leading role of Russian scientists in the creation of this branch of physics is shown.

**Keywords:** barium titanate, lead zirconate-titanate, atomic layer deposition, Ginzburg – Landau – Devonshire theory, phased array antenna, nonlinear dynamics, mathematical technology.

### References

1. Bugrov V. N., Rassadin A. E. Parametricheskij sintez MChRU v programmnoj srede "LIPS 4.0" s podderzhkoj proektirovaniya SKM "Mathematica 5.0" [Parametric synthesis of the MChRU in the software environment "LIPS 4.0" with support for the design of the SCM "Mathematica 5.0" // *Trudy XIV mezhhregional'noj nauchno-tehnicheskoy konferencii "Obrabotka signalov v sistemah nazemnoj radiosvyazi i opoveshcheniya"* – Proceedings of the XIV Interregional Scientific and Technical Conference "Signal processing in ground-based radio communication and warning systems" // ed. M. D. Venediktov and A. E. Rassadin. N. Novgorod. Povolzhye. 2006. Pp. 53–56.

2. *Integrirovannye segnetoelektricheskie ustrojstva* – Integrated ferroelectric devices / A. S. Valeev, V. N. Diaghilev, A. A. Lvovich [et al.] // *Electronic industry*. 1994. Vol. 6. Pp. 75–79.

3. Verba V. S. *Problemy i obshchiesistemnye voprosy razrabotki bortovyh RLS novogo pokoleniya* [Problems and system-wide issues of development of airborne radar of a new generation] // *Zhurnal radioelektroniki* – Journal of electronics. 2016. No. 1. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/jan16/11/text.pdf>. 29 p.

4. Vorotilov K. A., Mukhortov V. M., Sigov A. S. *Integrirovannye segnetoelektricheskie ustrojstva* [Integrated ferroelectric devices] / ed. by A. S. Sigov. M. Energoatomizdat. 2011. 175 p.: ill.

5. Vorotilov K. A., Sigov A. S. *Segnetoelektricheskie zapominayushchie ustrojstva* [Ferroelectric storage devices] // *Fizika tverdogo tela – Solid State Physics*. 2012. Vol. 54. Is. 5. Pp. 843–848.
6. Vorotilov K. A., Sigov A. S. *Segnetoelektricheskie zapominayushchie ustrojstva: perspektivnye tekhnologii i materialy* [Ferroelectric storage devices: advanced technologies and materials] // *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Nano- and Microsystem technology*. 2008. No. 10. Pp. 30–42.
7. *Formirovanie segnetoelektricheskikh nanostruktur dlya novogo pokoleniya ustrojstv mikro- i nanoelektroniki – Formation of ferroelectric nanostructures for a new generation of micro- and nanoelectronics devices* / K. A. Vorotilov, A. S. Sigov, A. A. Romanov, P. R. Mashevich // *Nanomaterialy i nanostrukturny – XXI vek – Nanomaterials and nanostructures – XXI century*. 2010. No. 1. Pp. 45 – 53.
8. Vul B. M., Gol'dman I. M. *Dielektricheskaya pronicaemost' titanatov metallov vtoroj gruppy* [Dielectric permittivity of titanates of metals of the second group] // *Doklady Akademii nauk SSSR – Reports of the Academy of Sciences of the USSR*. 1945. Vol. 46. No. 3. Pp. 154–157.
9. O. V. Losev i puti razvitiya russkoj mikroelektroniki v XXI v. – O. V. Losev and the ways of development of Russian microelectronics in the XXI century / S. A. Gilev, M. A. Novikov, A. A. Potapov, A. E. Rassadin // *Nelinejnyj mir – Nonlinear world*. 2015. No. 4. Pp. 4–11.
10. Ginzburg V. L. *O dielektricheskikh svoystvah segnetoelektrikov i titanata bariya* [On the dielectric properties of ferroelectrics and barium titanate] // *Zhurnal eksperimental'noj i teoreticheskoy fiziki – Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1945. Vol. 15. Vol. 12. Pp. 739–750.
11. *Elektronnaya mikroskopiya vysokogo razresheniya geteroepitaksial'nyh plenok titanata bariya-stronciya na podlozhkah MgO – High-resolution electron microscopy of barium-strontium titanate heteroepitaxial films on MgO substrates* / O. M. Zhigalina, A. N. Kuskova, A. L. Chuvilin [et al.] // *Poverhnost'. Rentgenovskie, sinhrotronnye i nejtronnye issledovaniya – Surface. X-ray, synchrotron, and neutron studies*. 2009. No. 7. Pp. 55–61.
12. Ivliev M. P., Sahnenko V. P. *Orbital'nye uporyadocheniya i povoroty oktaedrov kak osnova formirovaniya vysokotemperaturnoj struktury perovskitov s yan-tellerovskimi kationami* [Orbital orderings and rotations of octahedra as the basis for the formation of a high-temperature structure of perovskites with Yang-Teller cations] // *Sbornik trudov X Nauchno-prakticheskogo seminara "Aktual'nye problemy fiziki kondensirovannyh sred. K 110-letiyu H. I. Amirhanova" (Mahachkala, 6–9 iyunya 2017 g.) – Proceedings of the X Scientific-practical seminar "Actual problems of condensed matter physics. To the 110th anniversary of H. I. Amirkhanov" (Makhachkala, June 6–9, 2017)*. Makhachkala. 2017. Pp. 8–24.
13. *Dielektricheskij otклик tonkih plenok (Ba,Sr)TiO<sub>3</sub>v teragercevom i IK-diapazonah – Dielectric response of thin films (Ba, Sr)TiO<sub>3</sub> in the terahertz and IR ranges* / G. A. Komandin, V. M. Mukhortov, O. E. Borodnikov, I. E. Spektor // *Fizika tverdogo tela – Physics of the solid state*. 2013. Vol. 55. Is. 2. Pp. 252–256.
14. Kostromina O. S. *K teorii uravnenij tipa Dyuffinga s "gomoklinicheskoy vos'merkoj"* [To the theory of equations of Duffing type with the "homoclinic eight"] // *dis. ... k. f.-m. n. – dis. ... PhD in Phys.-math. sciences*. N. Novgorod. NNSU n. a. N. I. Lobachevskogo. 2016. 137 p. Available at: <https://diss.unn.ru/616>.
15. *Kolebaniya v odnorodnoj cepochke s segnetoelektricheskimi kondensatorami s otricatel'noj emkost'yu – Fluctuations in a homogeneous chain with ferroelectric capacitors with negative capacity* / O. S. Kostromina, A. A. Potapov, I. V. Rakut, E. A. Rassadin // *Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta MGU – Scientific notes of the faculty of physics of Moscow State University*. 2017. No. 6. Pp. 1760703–1–6.
16. Kurchatov I. V. *Segnetoelektriki* [Ferroelectrics]. L.; M. GTTI. 1933. 104 p.
17. Mel'nikov V. K. *Ob ustojchivosti centra pri periodicheskikh po vremeni vozmushcheniyah* [On the stability of the center under time-periodic perturbations] // *Trudy Moskovskogo matematicheskogo obshchestva – Proceedings of the Moscow Mathematical Society*. 1963. Vol. 12. Pp. 3–52.
18. *Fazovrashchatel' na shchelevoj linii, nagruzhennoj varaktorami na osnove nanorazmernyh plenok titanata bariya-stronciya – Phase shifter on a slit line loaded with varactors based on nanoscale films of barium-strontium titanate* / N. M. Muhortov, S. I. Masychev, A. V. Chub [et al.] // *Radio Engineering and Electronics*. 2007. Vol. 52. No. 11. Pp. 1402–1406.
19. *Geteroepitaksial'nyj rost plenok slozhnogo oksida iz samoorganizovannoj sistemy, obrazuyushchejsya v plazme gazovogo razryada – Heteroepitaxial growth of complex oxide films from a self-organized system formed in a gas discharge plasma* / V. M. Mukhortov, Yu. I. Golovko, G. N. Tolmachev, A. I. Mashchenko // *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Journal of Technical Physics*. 1999. Vol. 69. Is. 12. Pp. 87–91.
20. *Vnutrennie napryazheniya i deformacionnyj fazovyy perekhod v nanorazmernyh plenkah titanata bariya-stronciya – Internal stresses and deformation phase transition in nanoscale films of barium-strontium titanate* / V. M. Mukhortov, Yu. I. Golovko, Yu. I. Yuzyuk [et al.] // *Kristallografiya – Crystallography*. 2008. Vol. 53. No. 3. Pp. 536–543.
21. *Primenenie nanorazmernyh plenok titanata bariya-stronciya dlya perestraivaemyh sverhvysochastotnyh ustrojstv – Application of nanoscale films of barium-strontium titanate for tunable ultrahigh-frequency devices* / V. M. Mukhortov, S. I. Masychev, Yu. I. Golovko, A. V. Chub // *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Journal of Technical Physics*. 2006. Vol. 76. Is. 10. Pp. 106–109.
22. *Popov V. G. Effekt rezonansnogo tunnelirovaniya nositelej i ego ispol'zovanie v tranzistorah* [Effect of resonant tunneling of carriers and its use in transistors] // *Trudy 1-j Rossijsko-belorusskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Elementnaya baza otechestvennoj radioelektroniki", posvyashchennoj 110-yu so dnya rozhdeniya O. V. Loseva : v 2-h t. T. 2 – Proceedings of the 1st Belorussian and Russian scientific and technical conference "Circuitry domestic radio electronics", dedicated to 110th anniversary of the birth of Oleg Losev : in 2 vols. Vol. 2 / ed. by E. A. Rassadin. N. Novgorod. Nizhny Novgorod Radio Laboratory. 2013. Pp. 7–10.*
23. *Novejshie metody obrabotki izobrazhenij – The latest methods of image processing* / A. A. Potapov, Yu. V. Gulyaev, S. A. Nikitov [et al.]; ed. by A. A. Potapov. M. FIZMATLIT. 2008. 496 p.: ill.

24. Rassadin A. E. Radiolokacionnye stancii s sintezirovaniem apertury anteny [Radar stations with antenna aperture synthesis] // *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya* – Fundamental problems of radioelectronic instrumentation. 2009. Vol. 9. No. 4. Pp. 239–241.
25. Rassadin A. E. *Konceptual'noe proektirovanie radiolokacionnoj stancii s sintezirovaniem apertury anteny (RSA) na vozdushnom nositele "iz pervyh principov"* [Conceptual design of a radar station with synthesizing the antenna aperture (RSA) on an air carrier "from the first principles"] // *Zhurnal radioelektroniki* – Journal of Radio Electronics. 2012. No. 1. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/jan12/2/text.pdf>. 35 p.
26. Site NASA Glenn Research Center. URL: <https://www.nasa.gov/centers/glenn/home/index.html>.
27. Site Neocera Inc. Available at: <http://neocera.com>.
28. Experimental evidence of ferroelectric negative capacitance in nanoscale heterostructures / A. I. Khan, D. Bhowmik, P. Yu [et al.] // *Applied Physics Letters*. 2011. V. 99. Pp. 113501–1–10.
29. Total harmonic distortions in oscillatory circuit with a ferroelectric capacitor with a negative capacitance / O. S. Kostromina, A. A. Potapov, I. V. Rakut, A. E. Rassadin // *Eurasian Physical Technical Journal*. 2017. V. 14. No. 2 (28). Pp. 14–21.
30. Kostromina O. S., Rakut I. V., Rassadin A. E. On the possibility of experimental observation of one case of "the 16<sup>th</sup> weakened Hilbert problem" // International conference 'Shilnikov WorkShop-2016', dedicated to the memory of Leonid Pavlovich Shilnikov (1934–2011) (Nizhny Novgorod, Russia, December 16–17, 2016). Book of abstracts. Pp. 10–11. Available at: <http://www.shilnikov.unn.ru/doc/123allShWsh2016fin.pdf>.
31. Potapov A. A., Rassadin A. E., Tronov A. A. Generators of Chaotic Electrical Oscillations on Basis of Ferroelectric Capacitor with a Negative Capacitance // Proc. 14<sup>th</sup> Sino – Russia Symposium on Advanced Materials and Technologies / Ed. Mingxing Jia (Sanya, Hainan Province, China: November 28 – December 1, 2017). Beijing : Metallurgical Industry Press (China, <http://www.cnmp.com.cn>). 2017. Pp. 487–490.
32. Some notes about scanning probe microscopy, nanoengineering and methods of quantum mechanics / A. E. Rassadin, T. S. Sazanova, A. V. Stepanov, L. A. Fomin // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. V. 443. No. 1. Pp. 012027–1–13.
33. Rassadin A. E., Stepanov A. V. Mathematical technology for solving the Kardar-Parizi-Zhang equation with a source // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. V. 1392. Pp. 012059–1–6.
34. Valasek J. Piezoelectric and allied phenomena in Rochelle salt // *Physical Review*. 1920. V. 15. No. 6. Pp. 537–538; 1921. V. 17. No. 4. Pp. 475–481.
35. Wu S. Y. A new ferroelectric memory device, metal-ferroelectric-semiconductor transistor // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1974. V. ED-21. No. 8. Pp. 499–512.