

К. т. н. В. П. СИДОРЕНКО, д. т. н. В. Г. ВЕРБИЦКИЙ,  
Ю. В. ПРОКОФЬЕВ, к. ф.-м. н. А. Ю. КИЗЯК,  
к. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО

Украина, г. Киев, НИИ микроприборов  
E-mail: sidorenko@imd.org.ua

Дата поступления в редакцию  
19.12.2008 г.

Оппонент д. т. н. В. В. БАРАНОВ  
(БГУИР, г. Минск)

## СБИС ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОННОГО КООРДИНАТНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА ПРИБОРОВ ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА МАТЕРИАЛОВ

*Разработана СБИС, обеспечивающая одновременный анализ всех входящих в состав вещества элементов с высокой чувствительностью и точностью. Ее применение позволяет значительно снизить массу, габариты и энергопотребление детектора.*

Неотъемлемой частью процесса технологического перевооружения промышленности является создание аналитической аппаратуры для количественного анализа многоэлементных веществ, которая позволяет за короткое время и с высокой точностью проводить анализ материалов в процессе разработки новейших технологий в машиностроении, материаловедении, при поиске и добыче полезных ископаемых, а также в микроэлектронике, медицине, криминалистике, охране окружающей среды. К таким приборам относится лазерный масс-спектрометр с удлиненной фокальной плоскостью анализатора, дающей возможность проводить одновременный элементный анализ твердотельных образцов, различных по составу и физико-химическим свойствам, без специальной подготовки проб.

В качестве регистрирующего устройства в таких масс-спектрометрах используется фотографическая пластинка, что обуславливает ряд недостатков, главным из которых является невозможность наблюдения и, при необходимости, вмешательства в процесс регистрации ионов изотопов в реальном масштабе времени. Это особенно важно при элементном анализе различных по физико-химическим свойствам многокомпонентных примесей в основе вещества, поскольку точность их определения в значительной степени зависит от процесса юстировки масс-спектрометра.

Использование микроэлектронного координатно-чувствительного детектора (МКЧД) ионов, содержащего интегральную схему и умножитель электронов в виде микроканальной пластины (МКП) в качестве приемника ионов изотопов различных элементов, позволяет регистрировать результаты анализа в реальном масштабе времени и проводить юстировку масс-спектрометра по конкретным изотомам примесных элементов, что повышает точность и чувствительность анализа при уменьшении затрат пробы [1, 2].

В настоящей работе представлены результаты разработки СБИС, которая в составе МКЧД обеспечивает одновременное детектирование разделенного в пространстве спектра ионов, принимая и обрабатывая информацию об интенсивности потоков частиц различной массы. Размеры СБИС определяются количеством электродов-датчиков (в дальнейшем электроды) и соответствующих им каналов обработки информации.

### Общая характеристика СБИС

СБИС в составе МКЧД обеспечивает одновременное детектирование ионов изотопов элементов в широком спектре масс исследуемого вещества и в широком диапазоне концентраций — от  $10^{-7}$  до 100%. Микросхема содержит 384 канала приема и обработки информации и обеспечивает прием электронов электродами, преобразование заряда электронов в счетные импульсы, подсчет их 10-разрядными двоичными счетчиками и считывание результатов счета.

Чувствительность БИС по каждому входу —  $10^6$  электронов/импульс.

Максимальная частота счета импульсов счетчиками — 5—10 МГц.

Протокол обмена информацией микросхемы с периферией — последовательный, максимальная частота обмена — 4 МГц.

БИС изготавливается по КМОП-технологии с карманами N-типа. Размер кристалла —  $10,05 \times 10,2$  мм.

Микросхема выполняется бескорпусной на гибких носителях типа алюминий полиимид (модификация 2). Конструкция микросхемы обеспечивает монтаж на керамическую плату, разварку и герметизацию внешних выводов, монтаж микроканальных пластин (МКП) над областью электродов и позволяет устанавливать в составе МКЧД до пяти СБИС.

СБИС сохраняет электрические параметры, требуемую стойкость к механическим и климатическим факторам, а также возможность функционирования при давлении  $10^{-5}$  Па.

### Структурная схема и режимы работы СБИС

Схематическое изображение процесса формирования импульса электронов в МКЧД, структурная схема и временная диаграмма работы СБИС представлены на рис. 1—3.

Импульс электронов, падающих на электроды от микроканального умножителя (рис. 1), поступает на

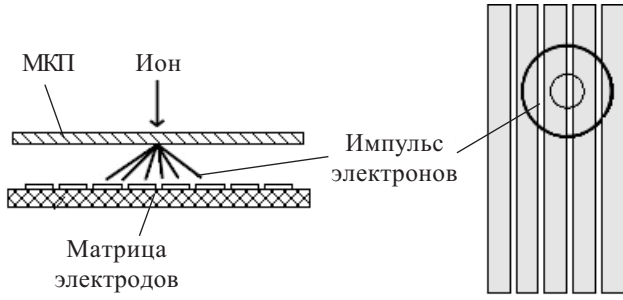


Рис. 1. Формирование импульса электронов в МКЧД

один из входов дифференциального каскада усилителя (рис. 2), разряжает его входную емкость и понижает потенциал на этом входе. На второй вход подается опорное напряжение от внешней контактной площадки  $U_{op}$ . Уровень опорного напряжения устанавливается потребителем и может изменяться с требуемым шагом в диапазоне от 1,5 до 3,5 В. Если разница напряжений на входах достаточна для срабатывания усилителя, то на выходе последнего формируется импульс, который подается на вход десятиразрядного счетчика. В разработанной СБИС используется 384 электрода, каждому из которых соответствуют свои усилитель и счетчик, образуя 384 канала при-

ема и обработки информации о распределенных в пространстве ионах (пучках электронов).

В процессе счета (рис. 3), когда количество единиц хотя бы одного из счетчиков достигает 1020, на внешней контактной площадке  $PP$  формируется напряжение низкого уровня, что означает переполнение хотя бы одного счетчика. При этом вход переполненного счетчика блокируется, а другие (не переполненные) счетчики могут продолжать считать. После завершения считывания информации из переполненных счетчиков на внешнем выводе  $PP$  снова формируется напряжение высокого уровня. Счет может быть остановлен также по желанию потребителя путем подачи напряжения низкого уровня на внешний вывод ( $STOP$ ). В этом случае блокируются входы всех счетчиков СБИС.

Для считывания информации из счетчиков на внешний вывод  $READ$  подается напряжение высокого уровня, на вывод  $CLK$  — импульсы тактирования считывания (по каждому импульсу низкого уровня выполняется последовательное считывание счетчиков СБИС), на вывод  $BREK$  — импульс высокого уровня (начало считывания кристалла), который по спаду должен перекрывать первый импульс тактирования ( $CLK$ ) низкого уровня.

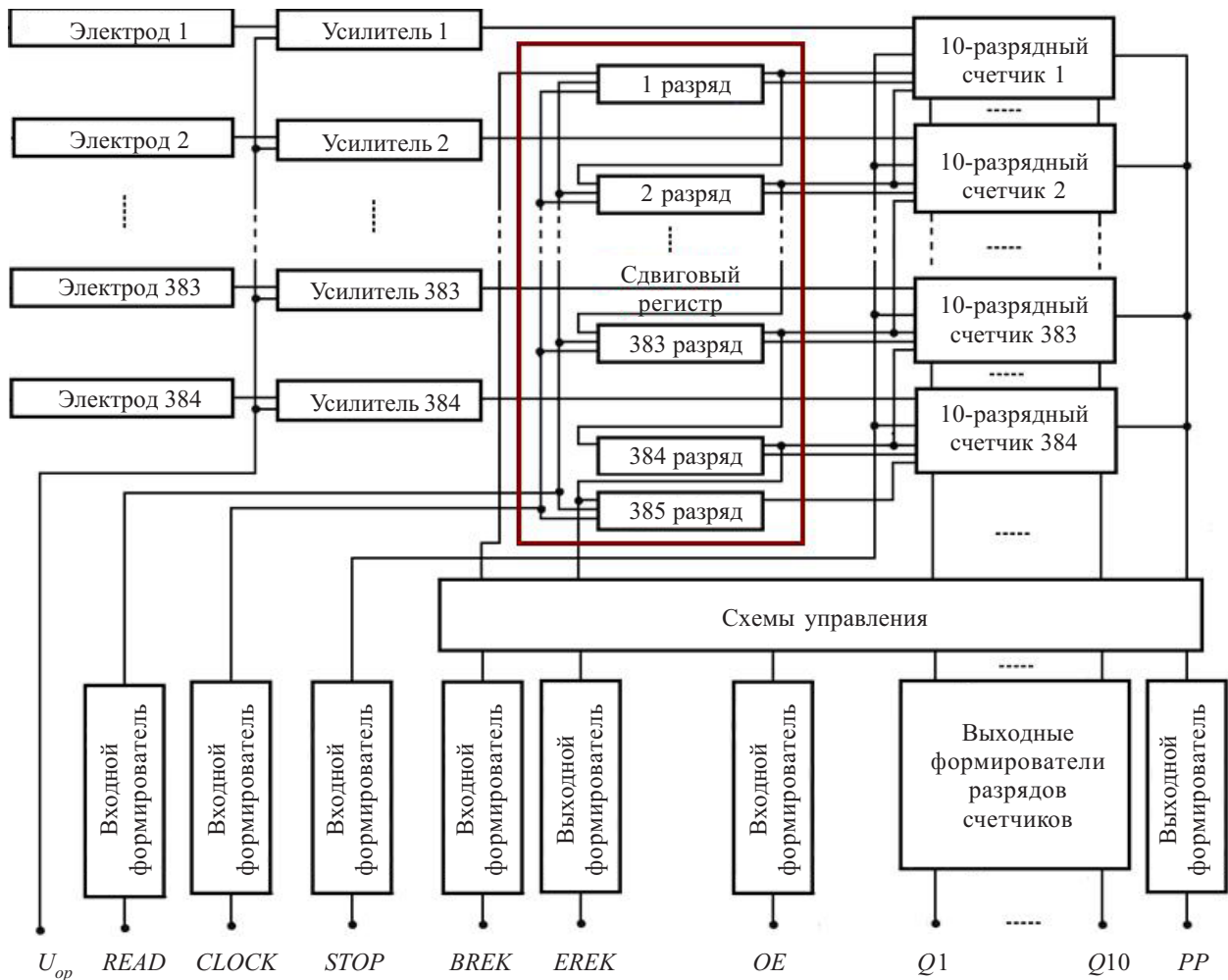


Рис. 2. Структурная схема СБИС

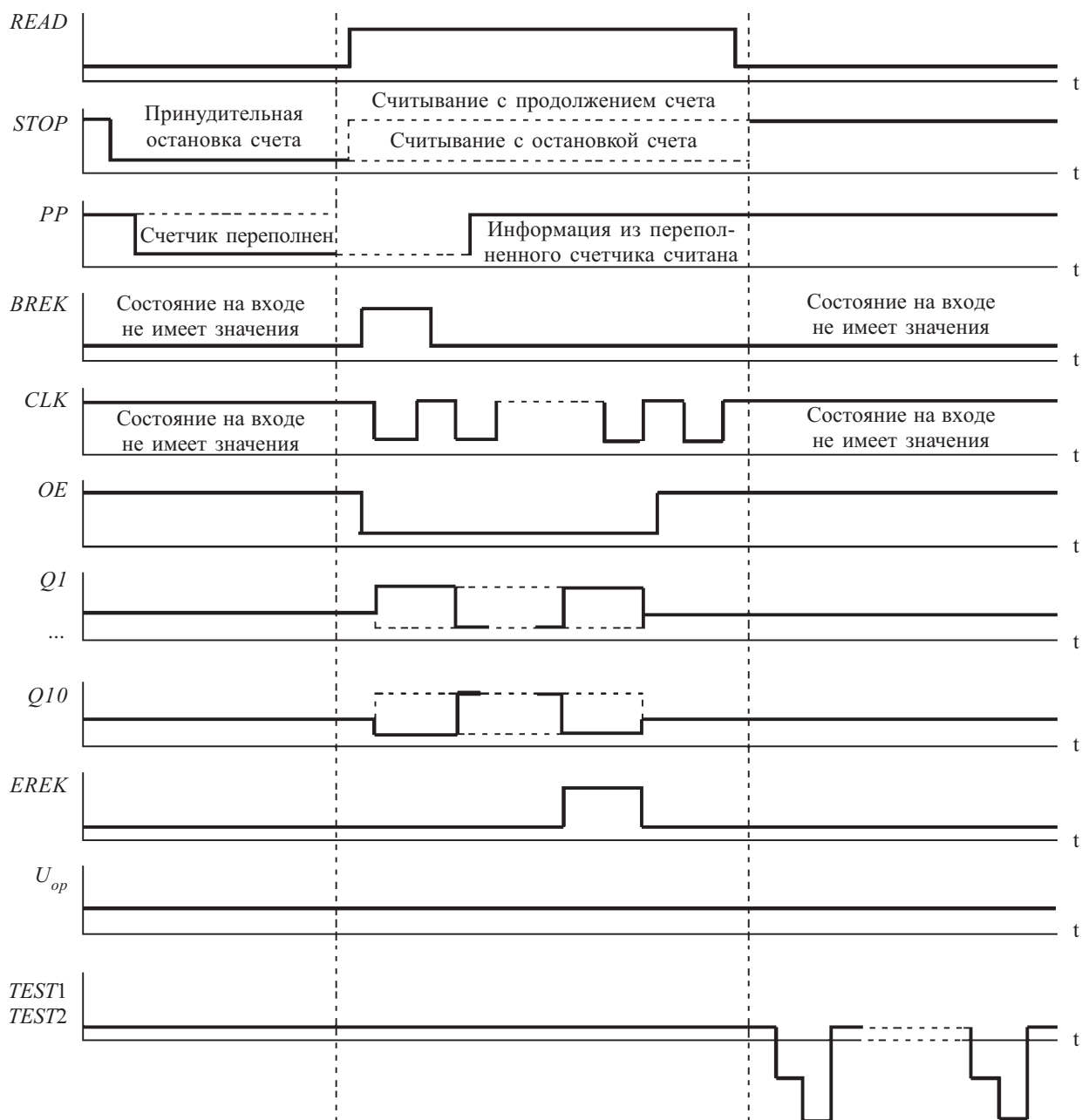


Рис. 3. Временная диаграмма работы СБИС

По спаду импульса *BREK* на вывод *OE* нужно подать напряжение низкого уровня, включающее выходные формирователи информации *Q1—Q10*.

После окончания считывания последнего, 384-го, счетчика, расположенного на кристалле, на внешнем выводе *EREK* (конец считывания кристалла) появляется импульс высокого уровня, который может быть использован в качестве импульса *BREK* для считывания информации из следующего кристалла, расположенного на плате.

В разработанной СБИС реализованы три варианта считывания.

В первом варианте считывание выполняется без прекращения счета. В этом случае блокируется счет только в том счетчике, информация из которого считывается. После окончания считывания счетчика (во

время считывания информации из следующего счетчика) осуществляется сброс счетчика, и блокировка счета в нем снимается.

Во втором варианте по команде *STOP* блокируется счет во всех счетчиках и выполняется последовательное считывание информации со всех счетчиков с последующим их обнулением после считывания. После окончания считывания снимается блокировка и возобновляется счет.

В третьем варианте считывание производится после появления признака переполнения (низкий уровень напряжения на выводе *PP*) хотя бы одного из счетчиков. При этом процесс собственно считывания реализуется по первому или второму варианту.

Для контроля функционирования кристалла в СБИС предусмотрены внешние выходы *TEST1* и

TEST2 (на рис. 2 не показаны). На них подается отрицательный импульс специальной формы, который за счет емкостной связи создает на электродах детектора потенциал, имитирующий импульс электронов от микроканального умножителя. Путем изменения напряжения на указанных выводах можно проконтролировать работоспособность кристалла и оценить чувствительность и быстродействие усилителя.

**Конструкция и технология изготовления СБИС**

Разработка топологического чертежа проводилась с учетом конструктивно-технологических ограничений для КМОП-технологии с карманом *N*-типа, а также требований, предъявляемых к электрическим параметрам и сборке кристалла на гибкий носитель. При этом топология кристалла и конструкция гибкого носителя обеспечивают возможность установки на плате МКЧД от одного до пяти СБИС на гибком носителе.

Электроды 1—384					
Входные усилители					
Счетчик 321—384	Счетчик 257—320	Счетчик 193—256	Счетчик 129—192	Счетчик 65—128	Счетчик 1—64
Схемы управления Формирователи входа-выхода					

Рис. 4. Компоновка узлов СБИС

В процессе разработки конструкции кристалла была решена задача оптимального размещения основных функциональных узлов СБИС. Выбранный вариант компоновки кристалла изображен на рис. 4. В центральной части кристалла расположен массив 10-разрядных счетчиков, состоящий из 6 столбцов по 64 счетчика каждый (рис. 5). В верхней части кристалла расположены электроды-датчики, тестовые электроды и входные усилители. Нижняя часть содержит узлы схемы управления, выходные усилители, формирователи входных и выходных сигналов, а также внешние контактные площадки. В зоне разделения кристаллов расположена тестовая структура.



Рис. 5. Фотография кристалла

Основные параметры конструкции: размер кристалла — 10,05 мм × 10,2 мм; размер электрода-датчика — 18 мкм × 2 мм; шаг — 25 мкм; количество элементов — 143489, в том числе МОП-транзисторов — 142322, диодов — 394, резисторов — 389, конденсаторов — 384.

Для контроля качества фотолитографического процесса на кристалле размещены структуры экспресс-контроля «ухода» размеров и «рассовмещения» слоев с шагом 0,1 мкм. Оптимальное размещение функциональных узлов и технологических структур на рабочей поверхности кристалла обеспечило его минимальные размеры — 10,05 и 10,2 мм соответственно по координатам *X* и *Y*.

Для реализации описанной выше СБИС был разработан и рассчитан технологический маршрут изготовления данной схемы. В качестве базового при разработке технологического маршрута использована модифицированная КМОП-технология с одним уровнем поликремния и двумя уровнями металла. СБИС была изготовлена на *p*-Si подложках КДБ-10-12/(100).

Технологический маршрут включает одиннадцать фотолитографий для формирования следующих слоев: области *n*-карманов; активные области; пассив-

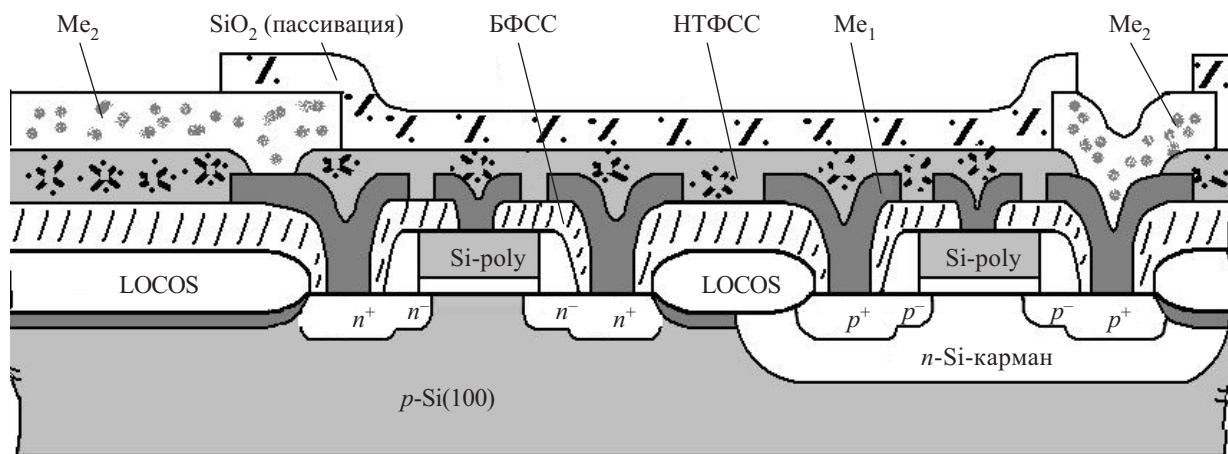


Рис. 6. Сечение структуры СБИС:

БФСС — бор-фосфор-силикатное стекло; НТФСС — низкотемпературное фосфор-силикатное стекло

ные области  $p^+$ -типа; затворы и проводники из поликремния; области под ионное легирование истоков-стоков  $n^+$ -типа; области под ионное легирование истоков-стоков  $p^+$ -типа; контакты-1; металл-1; контакты-2; металл-2; пассивация.

Первым уровнем металла  $Me_1$  (см. рис. 6) производилась разводка соединений между узлами и элементами, которые обеспечивают обработку полученного извне сигнала в виде потока электронов, а второй уровень металла  $Me_2$  использовался для формирования матрицы электродов, на которую падает пучок электронов, и для соединения усилителей со входами счетчиков. Минимальные размеры в схеме: длина канала транзистора по затвору — 2,4 мкм, размер контактного окна по первому уровню металла — 1,5×1,5 мкм. Транзисторы выполнены со слаболегированными стоком и истоком.

\*\*\*

Таким образом, создана СБИС, использование которой в МКЧД лазерного масс-спектрометра с удлиненной фокальной плоскостью анализатора позволяет одновременно получать информацию обо всех

элементах, входящих в состав материала, значительно снизить массу, габариты и потребляемую энергию детектора, уменьшить время анализа и затраты исследуемого материала.

Кроме того, разработанная СБИС может быть использована и в других приборах, предназначенных для регистрации профилей и пространственного положения пучков нейтральных и заряженных частиц и направленных потоков фотонов, применяющих в качестве вторичных преобразователей цифровые микроэлектронные позиционно-чувствительные регистраторы пространственного положения и интенсивности электронных пучков.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Langstaff, D. P., Bushell A., Chase, T., Evans, D. A. A fully integrated multi-channel detector for electron spectroscopy // Nuclear Instruments and Methods B.— 2005.— August.— P. 219—223.
2. Борискин А. И., Еременко В. М., Мордик С. Н. и др. Исследование ионно-оптических характеристик лазерного масс-спектрометра с координатно-чувствительным микроэлектронным детектором // Журнал технической физики.— 2008.— Т. 78, № 7.— С. 111—117.

#### НОВЫЕ КНИГИ

**Флуктуации и шумы в сложных системах живой и неживой природы / Под ред. Р. М. Юльметьева, А. В. Мокшина, С. А. Дёмина, М. Х. Салахова.— Казань: Изд-во Министерства образования и науки РТ, Редакционно-издательский центр «Школа», 2008.— 456 с.**

Книга представляет собой сборник оригинальных работ известных российских специалистов, посвященных проблемам изучения фундаментальной роли флуктуаций и шумов в поведении сложных систем живой и неживой природы, а также их возможным приложениям в физиологии, медицине, нейрофизиологии, радиофизике и функциональной электронике, сейсмологии, астрофизике и других областях современного естествознания. Книга представляет собой коллективную монографию, написанную ведущими специалистами в данной области. Предназначена для широкого круга специалистов по фундаментальным и прикладным вопросам исследования флуктуаций и шумов и их возможным приложениям в большом круге явлений современной физики и естествознания. Книга содержит результаты последних исследований, а также работы обзорного характера. Одна из основных целей данного издания состоит в привлечении студентов, аспирантов и молодых ученых к увлекательному направлению исследовательской деятельности в новой, интенсивно развивающейся области физики.

Содержание:

1. В. В. Учайкин «Вселенная как фрактальная пыль: флуктуации и корреляции».
2. В. С. Анищенко, Т. Е. Вадивасова, Г. Е. Стрелкова «Влияние шума на хаотические системы».
3. Р. М. Юльметьев, П. Ханги «Механизмы формирования долговременных корреляций в сложных системах за счет статистических эффектов памяти».
4. С. Ф. Тимашев «Фликкер-шумовая спектроскопия как общий феноменологический подход к извлечению информации из хаотических сигналов».
5. Р. Р. Нигматуллин «Что такое КУМ'а (количественная универсальная метка) и с чем ее едят?»
6. В. В. Розанов, О. В. Руденко, Н. Н. Сысоев «Сложные задачи нелинейной акустики и гемодинамики».
7. А. В. Мокшин «Процессы структурного упорядочения в металлических стеклах: влияние сдвигового воздействия».
8. А. А. Потапов «Фрактальные методы исследования флуктуаций сигналов и динамических систем в пространстве дробной размерности».
9. В. В. Афанасьев, С. С. Логинов «Диагностика электронных динамических систем на основе негармонических дробно-степенных спектров».
10. В. В. Афанасьев, В. П. Данилаев, Ю. Е. Польский «Обобщенные многомодовые модели в анализе и диагностике фрактальных структур, живых и неживых динамических систем».
11. Г. В. Грушевская, Г. Г. Крылов «Биологически мотивированные нейросети из хаотических осцилляторов».
12. А. Н. Чувывров «Фазовые волны в нематических жидких кристаллах: следствие самоорганизации гидродинамической флуктуации».
13. Н. Г. Мигранов, Р. Н. Мигранова «Кооперативные явления в открытых системах: функциональный подход».
14. Г. В. Встовский «Выявление пространственных и временных иерархических структур в сложных системах».

