



**МИНПРОМТОРГ  
РОССИИ**

*Достижение высокого технологического уровня радио-электроники невозможно без поддержания современного уровня знаний. Серия книг «Мир радиоэлектроники» с 2010 года успела зарекомендовать себя как собрание актуальной научной и технической литературы.*

*Директор Департамента  
радиоэлектронной промышленности  
Минпромторга России С.В. Хохлов*



**ТЕХНОСФЕРА**  
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ КНИГ «МИР РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

**Хохлов Сергей Владимирович**, директор Департамента радиоэлектронной промышленности Минпромторга РФ – председатель редсовета

### *Члены совета:*

**Авдонин Борис Николаевич**, ОАО ЦНИИ «Электроника», д.т.н., профессор, г. Москва  
**Акопян Иосиф Григорьевич**, ОАО «МНИИ «Агат», д.т.н., профессор, г. Москва  
**Анцев Георгий Владимирович**, ген. директор ОАО «Концерн «Моринформсистема-Агат», г. Москва  
**Белый Юрий Иванович**, ген. директор НИИП им. В.В. Тихомирова, г. Жуковский  
**Беккиев Азрет Юсупович**, ген. директор ОАО «Концерн «Созвездие», д.т.н., профессор, г. Воронеж  
**Боев Сергей Федотович**, ген. директор ОАО «РТИ», д.э.н., профессор, г. Москва  
**Борисов Юрий Иванович**, заместитель Министра обороны РФ, д.т.н., профессор, г. Москва  
**Букашкин Сергей Анатольевич**, ген. директор ОАО «Концерн «Автоматика», д.т.н., профессор, г. Москва  
**Бушуев Николай Александрович**, ген. директор ОАО «НПП «Алмаз», д.э.н., профессор, к.ф.-м.н., г. Саратов  
**Верба Владимир Степанович**, ген. директор ОАО «Концерн радиостроения «Вега», д.т.н., профессор, г. Москва  
**Верник Петр Аркадьевич**, директор АНО «Институт стратегий развития», г. Москва  
**Вилкова Надежда Николаевна**, ген. директор ЗАО «МНИТИ», к.т.н., д.э.н., профессор, г. Москва  
**Гаршин Вадим Вениаминович**, ген. директор ОАО « Мосэлектронпроект», г. Москва  
**Гуляев Юрий Васильевич**, директор института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова, академик РАН, г. Москва  
**Зверев Андрей Владимирович**, ген. директор ОАО «Российская электроника», к.э.н., г. Москва  
**Кожанов Дмитрий Александрович**, ген. директор ФГУП «ЦНИИ ЭИСУ», г. Москва  
**Козлов Геннадий Викторович**, советник ген. директора ОАО «Концерн ПВО «Алмаз-Антей», д.т.н., профессор, г. Москва  
**Красников Геннадий Яковлевич**, ген. директор ОАО «НИИМЭ», академик РАН, г. Зеленоград  
**Критенко Михаил Иванович**, зам. начальника Департамента планирования и промышленной политики, к.т.н., г. Москва  
**Мальцев Петр Павлович**, директор ИСВЧПЭ РАН, д.т.н., профессор, г. Москва  
**Минаев Владимир Николаевич**, д.т.н., профессор, г. Москва  
**Муравьев Сергей Алексеевич**, советник директора Департамента Радиоэлектронной промышленности Минпромторга России, к.т.н., с.н.с., г. Москва  
**Немудров Владимир Георгиевич**, ген. директор ОАО «НИИМА «Прогресс», д.т.н., профессор, г. Москва  
**Попов Владимир Васильевич**, президент ОАО «Светлана», к.т.н., г. Санкт-Петербург  
**Ризнык Андрей Владимирович**, ген. директор ОАО «Системы управления», г. Москва  
**Сигов Александр Сергеевич**, академик РАН, президент МГТУ МИРЭА, г. Москва  
**Суворов Александр Евгеньевич**, ген. директор ФГУП «МКБ «Электрон», г. Москва  
**Турилов Валерий Александрович**, ген. директор ОАО «КНИИТМУ», к.т.н., доцент, г. Калуга  
**Федоров Игорь Борисович**, президент МГТУ им.Н.Э. Баумана, академик РАН, д.т.н., профессор, г. Москва  
**Чаплыгин Юрий Александрович**, ректор МГИЭТ (ТУ МИЭТ), чл.-корр. РАН, г. Зеленоград  
**Шахнович Илья Владимирович**, шеф-редактор ЗАО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», г. Москва  
**Шубарев Валерий Антонович**, ген. директор ОАО «Авангард», д.т.н., профессор, г. Санкт-Петербург  
**Якунин Александр Сергеевич**, ген.директор ОАО «Объединенная приборостроительная корпорация», г. Москва

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

А.С. Комаров, Д.В. Крапухин, Е.И. Шульгин

**УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМ УРОВНЕМ  
ВЫСОКОИНТЕГРИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ  
(научно-технологические проблемы и аспекты развития)**

Под редакцией  
доктора технических наук, профессора  
П.П. Мальцева

ТЕХНОСФЕРА  
МОСКВА  
2014

**УДК 621.3**

**ББК 32.85**

**К63**

**К63** Комаров А.С., Крапухин Д.В., Шульгин Е.И.

**Управление техническим уровнем высокоинтегрированных электронных систем** (научно-технологические проблемы и аспекты развития) / Под редакцией д.т.н., профессора П.П. Мальцева  
**Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2014. – 240 с. ISBN 978-5-94836-397-4**

В монографии представлены результаты исследований и разработок по реализации «Основ политики Российской Федерации в области развития электронной компонентной базы на период до 2010 г. и дальнейшую перспективу», утвержденным президентом Российской Федерации.

Сформулированы основные принципы и методы управления техническим уровнем при реализации системной организации по проектированию, моделированию и технологическому обеспечению изготовления СБИС типа «система на кристалле», разработана концепция построения инфраструктуры сквозного проектирования сложно-функциональных СБИС от системного уровня до топологии кристалла, выбора технологического базиса для изготовления СБИС с учетом обеспечения специальных требований по радиационной стойкости, организации процесса изготовления фотошаблонов и микросхем, последующего их тестирования, сборки, испытаний и применения.

**УДК 621.3**

**ББК 32.85**

© ИСВЧПЭ РАН, 2014

© ЗАО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление, 2014

**ISBN 978-5-94836-397-4**

# Содержание

Список условных сокращений.....	8
Введение.....	10
<b>Глава 1. Исследование направлений и путей развития сложнофункциональных изделий микроэлектроники, проектирование РЭА на основе СБИС типа «система на кристалле».....</b>	<b>35</b>
1.1. Исследования направлений и путей развития сложнофункциональных изделий микроэлектроники, их функционального состава и характеристик.....	37
1.2. Особенности конструирования СБИС типа «система на кристалле», основные проектные платформы СБИС типа «система на кристалле».....	38
1.2.1. Процессорные ядра и СФ-блоки многократного использования.....	47
1.2.2. СБИС типа «система на кристалле» на базе реконфигурируемых структур.....	49
1.2.3. Встраиваемые программируемые логические ядра.....	58
1.2.4. Аналоговые функциональные блоки и блоки со смешанной обработкой сигнала для СБИС типа «система на кристалле».....	58
1.2.5. СФ-блоки цифровых приемников/передатчиков типа «система на кристалле».....	58
Выводы к главе 1.....	59
<b>Глава 2. Разработка и обеспечение реализации научно-методических принципов управления научно-техническим уровнем высокоинтегрированных электронных систем.....</b>	<b>65</b>
2.1. Системный анализ физико-технологических ограничений реализации развития технического уровня сложнофункциональных микроэлектронных систем.....	67
2.2. Анализ функциональной полноты и достаточности разрабатываемых и планируемых к разработке СФ-блоков для проектируемых СнК в обеспечение РЭА.....	71
2.2.1. Структурные решения СБИС типа «система на кристалле», направления их развития и опыт реализации.....	73
2.2.2. Определение степени применимости СФ-блоков.....	88
2.3. Оценка достаточности действующей НТД по разработке и производству СБИС типа СнК с использованием СФ-блоков.....	94
2.3.1. Направления перспективных работ по созданию нормативных документов по СФ-блокам и СБИС типа СнК в интересах РЭА.....	101

2.4. Организация разработки СБИС типа «система на кристалле» на основе СФ-блоков.....	104
2.4.1. Инфраструктура разработки СБИС типа СнК.....	107
2.4.2. Основные методические этапы по развитию инфраструктуры проектирования СФ-блоков и СнК.....	114
2.4.3. Современные подходы к проектированию СБИС с топологическими нормами 0,18—0,25 мкм и последующим переходом в нанометровые области.....	116
2.5. Применение статистического метода для анализа и прогнозирования развития проектно-технологического базиса сложнофункциональных СБИС.....	125
Выводы к главе 2.....	133
<b>Глава 3. Формирование унифицированной номенклатуры СФ-блоков по технологии КМОП/КНС для создания радиационно-стойких СБИС типа «система на кристалле».....</b>	<b>136</b>
3.1. Анализ направлений и путей развития в области проектирования и изготовления сложнофункциональных изделий микроэлектроники типа СБИС «система на кристалле» на основе СФ-блоков, анализ проектно-технологических возможностей по их реализации.....	138
3.1.1. Исследование архитектурно-структурных решений СБИС типа СнК.....	143
3.2. Специальные требования к СФ-блокам СБИС типа «система на кристалле», предназначенным для работы в аппаратуре космических аппаратов с длительным сроком эксплуатации.....	148
3.3. Тенденции развития СБИС для бортовой космической аппаратуры. Выбор и обоснование технологии, обеспечивающей изготовление СБИС типа «система на кристалле» для космических аппаратов с длительным сроком эксплуатации.....	152
Выводы к главе 3.....	159
<b>Глава 4. Исследования по созданию технологии производства структур с ультратонкими слоями кремния на сапфире.....</b>	<b>162</b>
4.1. Анализ современного состояния технологий производства КНС структур с ультратонким эпитаксиальным слоем кремния и КМОП- микросхем на основе КНС структур с ультратонким слоем кремния.....	163
4.2. Создание СБИС, в том числе типа «система на кристалле», и СФ-блоков для них по технологии КМОП/КНС аппаратуры управления ракетно-космической техники и автоматики специального назначения.....	175

4.3. Разработка и создание технологии КНС структур с ультратонкими слоями кремния и проектных решений для реализации КМОП/КНС СБИС на их основе.....	176
Выводы к главе 4.....	178
<b>Заключение.....</b>	<b>182</b>
<b>Литература.....</b>	<b>190</b>
<b>Приложение А (Справочно-аналитическое). Научно-методические рекомендации (аннотировано). Исследование и разработка методов физико-технического и нормативно-методического контроля технического уровня СБИС с предельными топологическими нормами.....</b>	<b>199</b>
<b>Приложение Б. Информационная среда проектирования. Методические рекомендации. Состав и основное содержание разделов справочно-информационного листа для описания СФ-блоков на различных этапах интеграции в СБИС и требования к содержанию заявки на разработку СБИС типа «система на кристалле».....</b>	<b>206</b>
<b>Приложение В (аннотировано). Информационная среда проектирования. Методические рекомендации по правилам заказа на изготовление СБИС в режиме Foundry.....</b>	<b>237</b>

## Список условных сокращений

- ADC (Analog-to-Digital Converter) — аналого-цифровой преобразователь (АЦП)  
D (Digital) — цифровой блок  
DAC (Digital-to-Analog Converter) — цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП)  
DSP (Digital Signal Processor) — цифровой сигнальный процессор  
IP-блок — блок интеллектуальной собственности  
MS (Mixed Signal) — блок, осуществляющий обработку смешанных сигналов  
RISC (Reduced Instruction Set Computer) — компьютер с сокращенным набором команд  
SLI device — микросхема системного уровня интеграции  
System ASIC — специализированная СБИС система  
System LSI — система высокой степени интеграции  
АСН — автоматика специального назначения  
АЦП — аналого-цифровые преобразователи информации  
БИС — большая интегральная схема  
БМК — базовый матричный кристалл  
В/В-блок — блок ввода/вывода  
ВВСТ — вооружение, военная и специальная техника  
ВВТ — вооружение и военная техника  
ВМПП — встраиваемые перепрограммируемые вентильные матрицы;  
ВЧ-блок — блок, осуществляющий обработку высокочастотных сигналов;  
ИС — дискретная интегральная схема  
КА — космический аппарат  
КМОП — комплементарная «металл-окисел-полупроводник» структура  
КНИ — кремний на изоляторе  
КНС — кремний на сапфире  
МШУ — малошумящий усилитель  
ОЗУ — оперативное запоминающее устройство  
ПДЗ — предельно достижимое значение  
ОКР — опытно-конструкторская работа  
ПЗС — прибор с зарядовой связью  
ПЗУ — постоянное запоминающее устройство  
ПЛИС — программируемая логическая интегральная схема  
ПО — программное обеспечение  
ППЗУ — программируемое постоянное запоминающее устройство  
РКТ — ракетно-космическая техника  
РЭА — радиоэлектронная аппаратура  
РЭС — радиоэлектронные средства  
РЭСВ — радиоэлектронные средства вооружения

- САПР — система автоматизированного проектирования
- СБИС — сверхбольшая интегральная схема
- СДОЗУ — синхронное динамическое запоминающее устройство
- СнК — система на кристалле
- СПИС — специализированная интегральная схема
- СУ — система управления
- СФ-блок — сложнофункциональный блок
- ТУ — технические условия
- ЦАП — цифро-аналоговые преобразователи информации
- ЦВС — цифровая вычислительная система
- ЦПОС — цифровой процессор обработки сигналов
- ЭВМ — электронно-вычислительная машина
- ЭКБ — электронная компонентная база
- ЭППЗУ — электрически перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство
- ЭРИ — электрорадиоизделие (в настоящее время практически не применяется)

## Введение

В начале XXI века развитость страны можно характеризовать как ее способности производить передовую электронику, современную радиоэлектронную аппаратуру, информационно-телекоммуникационные системы, сложнофункциональные изделия микроэлектроники, твердотельную СВЧ электронику, приборы оптики и фотоэлектроники, другую электронную компонентную базу. Если в стране есть передовая электроника, то имеются возможности создавать «умную» технику, «смарт-оружие», вести киборгизацию, создавать высокотехнологичные продукты. Современная электроника представляет собой инновационный и высокоприбыльный сектор экономики со стабильным и быстро растущим спросом, хорошим экспортным потенциалом и высокой удельной стоимостью продукции. Мировой рынок высокотехнологичной электронной продукции оценивается в 3,5–4 трлн долл. США.

Электроника — самая быстро развивающаяся отрасль. Совокупные темпы годового роста в мире составили в электронике 7,5%, гражданской авиации — 5%, химической промышленности — 5%, автомобильной промышленности — 3%, нефтяной промышленности — 2%, мировом ВВП — 3%.

Планируемое к 2020 году значительное обновление техники и вооружения базируется на применении перспективной ЭКБ и является важной составной частью реализации Программы вооружения.

Технический уровень ЭКБ, схемотехнические и конструктивные решения в значительной степени определяют облик радиоэлектронной аппаратуры вооружения и военной техники, ее тактико-технические характеристики (такие как точность, дальность действия, разрешающая способность, скрытность, помехозащищенность, возможность решения боевых задач в реальном масштабе времени), а также масса-габаритные характеристики, надежность функционирования и пр. [1].

Однако состояние отечественной технологической базы, разработок, серийного производства ЭКБ свидетельствует о том, что электронная промышленность Российской Федерации не вышла из глубокого структурно-технологического кризиса. Основными причинами, сдерживающими развитие отечественной ЭКБ, являются:

- резкое падение объемов производства и сокращение номенклатуры серийно выпускаемых электронных компонентов военного назначения;
- постоянное повышение доли устаревшей ЭКБ, рост применения зарубежных электронных компонентов при одновременном снижении уровня обеспеченности отечественными электронными компонентами ведущихся разработок и серийного производства систем ВВСТ;

- моральное и физическое старение технологического оборудования и основных фондов электронной промышленности из-за отсутствия инвестиционных средств на техническое перевооружение в течение последних 15 лет;
- практически полное отсутствие отечественного гражданского сектора производства наиболее наукоемких видов ЭКБ, применяемой в вычислительной технике, средствах связи и телекоммуникациях, навигационном обеспечении и т. д.;
- открытие российского рынка для зарубежных производителей бытовой электронной техники при отсутствии какой-либо государственной протекционистской политики. За последние десятилетия импортная электроника и средства мобильной связи стали практически доминирующими на российском рынке.

В результате негативного проявления указанных факторов в электронной промышленности имеют место следующие тенденции [2]:

- во вновь разрабатываемых отечественных ВВСТ применяется до 70 % иностранных электронных компонентов. В силу действующих за рубежом ограничений на поставку в Россию специальных электронных компонентов разработчикам радиоэлектронных средств приходится довольствоваться не соответствующей необходимым требованиям заказчиков номенклатурой импортной ЭКБ, что приводит к целому ряду негативных моментов, и в частности к дополнительным затратам на вынужденную проверку изделий при ее применении [3];
- во многом утрачены технологии производства ЭКБ разработки 70—80-х годов, хотя и устаревшей, но являющейся основой находящихся в настоящее время на вооружении образцов ВВСТ, причем потери технологий составляют 40—50 %. Частично это связано с распадом СССР, после которого часть электронных производств осталась вне России (Украина, Беларусь, Прибалтика, Армения), нарушилась сложившаяся кооперация. Наиболее существенные потери понесло производство радиационностойкой компонентной базы;
- из-за технологического отставания в области микроэлектроники и твердотельной СВЧ электроники имеются серьезные проблемы в создании современного радиолокационного вооружения, использующего активные фазированные антенные решетки (зенитно-ракетные системы, радиолокаторы наземного и авиационного базирования, связные системы).

Сложившая ситуация вполне адекватна тому вниманию и финансированию, которые характеризуют отечественную наукоемкую промышленность в последние 20 лет. Много было выступлений, статей и докладов в органы исполнительной власти по проблемам отечественной электроники [4].

Дальнейшее отставание России в такой ключевой области промышленности, как производство электронных компонентов, крайне опасно и недопустимо, поскольку не позволит перейти от «сырьевой» экономики к экономике «знаний» и обеспечить первоочередное развитие высокотехнологичных отраслей промышленности, решение задач по обеспечению безопасности государства.

Важнейшая задача — предложить на основе всестороннего анализа существующего состояния российской и мировой электроники оптимальный путь развития отечественной электронной промышленности, выбрать приоритеты, сконцентрировать финансовые усилия как государства, так и частного сектора на ключевых направлениях этого развития. Комплексность данной проблемы в системе управления техническим уровнем на этапах проектирования, производства и эксплуатации изделий электроники показана на рис. 1.

В высокотехнологичных отраслях промышленности, связанных с созданием сложной техники, в том числе в радиоэлектронике, используют многоуровневые представления проектируемых систем, и, следовательно, имеет место специализация предприятий по номенклатуре создаваемых изделий. В целом такую систему для высокоинтегрированных микроэлектронных систем можно представить как инфраструктуру трехуровневого процесса проектирования и изготовления РЭА и ЭКБ (рис. 2).

Анализ развития автоматизированных систем проектирования высокоинтегрированных микроэлектронных изделий (EDA — Electronic Design Automation) показал, что наблюдается значительная динамика их развития. Средства проектирования развивались от несвязанных друг с другом программ расчета электронных схем с формализацией постановки проектных задач и выбора соответствующего математического аппарата к совершенствованию математического обеспечения и развитию интерактивных средств проектирования на рабочих станциях и далее для субмикронной технологии БИС — переход к проектированию на основе программируемых логических микросхем (Complex Programmable Logic Device — CPLD), программируемых вентильных матриц (Field Programmable Gate Array — FPGA).

В 80-е годы средства проектирования СБИС получили дальнейшее развитие до уровня системных сред, включающих решения систем из нескольких тысяч и более нелинейных уравнений. Это период ознаменовался совершенствованием математического обеспечения и развитием интерактивных средств проектирования на рабочих станциях [5]. Появляются технологии разработки микропроцессоров и схем памяти, заказных и полужаказных СБИС (ASIC — Application-Specific Integrated Circuits). Технологические и схемные характеристики каждого из этих типов СБИС имеют свои особенности. Так, если в случае CPLD для отражения структуры конкретной схемы в инвариантном по отношению к приложению множестве функциональных ячеек требуется выполнить заключительные техно-



логические операции металлизации, то в случае FPGA программатор по разработанной в ECAD программе просто расплавляет имеющиеся перемычки (fuse) или наоборот их создает, локально ликвидируя тонкий изолирующий слой (antifuse). Эти различия обуславливают особенности проектирования схем и требуют их отражения в применяемом математическом и программном обеспечении ECAD (Electronic computer-Aided Design). Современные развитые ECAD (например, САПР таких фирм, как Synopsys, Mentor Graphics или Cadence) имеют большое число программ различного назначения.

В начале 90-х годов началось бурное развитие направления, связанного с системными вопросами EDA. Средства интеграции программного обеспечения в ECAD, управления проектированием и проектными данными, созданные в то время и получившие название системных сред (Frameworks), рассмотрены в работе [6]. В настоящее время системные среды часто называют PDM (Product Data Management), в них включают программы управления проектированием и проектными данными, стандартные форматы и языки представления и обмена данными. Средства, составляющие системную среду, помогают разработчикам СБИС в использовании имеющегося ПО САПР, их называют HDL Add-In Tools [7]. Среди них выделяют средства, выполняющие следующие функции:

- 1) интеграция ПО, т.е. обеспечение интероперабельности между различными прикладными программами;
- 2) управление версиями и конфигурацией проекта, т.е. контроль целостности проекта;
- 3) реализация в имеющемся ПО определенных проектных операций с помощью языков расширения;
- 4) генерация моделей и управление библиотеками;
- 5) преобразование данных о схемах из одного представления в другое, например графических диаграмм или списков цепей в файлы на языках проектирования Verilog или VHDL;
- 6) отладка моделей, контроль ошибок, визуализация формы сигналов и т.п.

Примером системной среды может служить среда, созданная в компании *Mentor Graphics*. Ее составные части — Falcon Framework's Design Manager, Decision Support System (DSS), BOLD и язык AMPLE [8]. Design Manager используется для построения версий САПР, поддержки параллельного проектирования и управления конфигурацией проектов, обеспечивает интеграцию программных средств и доступ пользователя к программам и данным с помощью удобного графического интерфейса. Система поддержки решений DSS предназначена для развития средств проектирования и управления проектными данными. Редактор BOLD управляет документацией. Наконец, процедурный язык AMPLE позволяет выразить требования к расширению ПО для DSS и описать взаимосвязи между компонентами ПО.

В настоящее время средства проектирования обеспечивают работу проектировщиков с наноразмерными элементами схем с покрытием полного маршрута разработки схемы и возможностью использования СФ-блоков при создании СБИС типа «система на кристалле».

На фоне опережающего развития субмикронной полупроводниковой технологии все более остро встает проблема разработки принципиально новых методологий и средств автоматизированного проектирования сверхсложных интегральных схем и аппаратуры на их основе.

Ведущие электронные фирмы, решая данную проблему, наряду с традиционной разработкой и массовым производством микросхем высокоинтегрированных СБИС процессоров высокой производительности, СБИС памяти сверхбольшой емкости, программируемых логических схем начали интенсивно использовать принципиально новый подход к реализации специализированных СБИС. В основу такой методологии положена новая идеология создания блоков и узлов аппаратуры в виде специализированных СБИС типа «система на кристалле» («system-on-chip»), объединяющих на одном кристалле так называемые виртуальные компоненты (VC) в виде блоков «интеллектуальной собственности» (Intellectual property или IP-блоки) (далее — СФ-блоки, как это принято у нас). К данным СФ-блокам относятся СФ-блоки процессоров различного вида, СФ-блоки аналоговых и аналого-цифровых узлов, СФ-блоки «жесткой» логики, память, интерфейсы. То есть СБИС типа «система на кристалле» — принципиально аппаратно-программная реализация той или иной функционально законченной части аппаратуры.

Повторное использование верифицированных и аттестованных крупных СФ-блоков существенно сокращает сроки разработки СБИС «система на кристалле», обеспечивает большую вероятность безошибочности проекта. При этом СФ-блоки в виде моделей используются при отработке как алгоритмов работы систем, аппаратуры, так и собственно микросхем «система на кристалле», т. е. на системном уровне проектирования происходит объединение САПР систем, аппаратуры и СБИС.

Все это предопределило революцию в методологии и средствах САПР аппаратуры и элементной базы с использованием мощного аппарата многоуровневого моделирования, синтеза и верификации на каждом этапе проектирования: системном, функциональном, логическом и физическом на основе развитой библиотеки СФ-блоков.

Это наряду с использованием «прототипов» на ПЛИСах позволяет сократить итерации в процессе проектирования, вплоть до получения работоспособных образцов СБИС «система на кристалле», и обеспечить «сквозной» маршрут проектирования «аппаратура — элементная база». В пределах этого «сквозного»

маршрута средства САПР системного и функционального уровня едины для аппаратуры и СБИС.

В ECAD фирмы *Cadence* для управления проектными данными имеется файловая система, являющаяся частью системной среды *Cadence Design Framework II*. В ней предусмотрена иерархическая организация проектных данных с выделением уровней библиотек, категорий (*categories*), ячеек (*cells*), видов (*Cellviews*). Ячейка — базовый объект, который может иметь несколько различных представлений (видов). Ячейки объединяются в родственные группы — категории, а категории — в библиотеки. Разработчик с помощью системной среды имеет доступ к проектным данным, может создавать свои библиотеки, ячейки, виды.

Системная среда *CAST Design Data Management* [9] выполняет функции управления потоками проектных задач, библиотеками, архивированием версий.

Для управления версиями в системных средах вводят ряд статусов данных. Текущая разрабатываемая версия имеет рабочий статус и локально доступна непосредственным исполнителям. После завершения определенных проектных операций данные становятся доступными всем членам рабочей группы. После согласования решений данные получают статус утвержденной (или архивной) версии.

Для визуализации данных используется несколько типов браузеров, с помощью которых пользователь может контролировать потоки проектных процедур, структуру проектных данных, получать сведения о версиях проекта и параметрах его частей, сопоставлять разные аспекты (представления) проекта, например топологию, схему, результаты моделирования и т. п.

## Синтез проектных решений

Типичный маршрут разработки СБИС включает этапы системного, функционального, логического и конструкторского проектирования. Ряд ведущих фирм-разработчиков ECAD предлагает средства, покрывающие полный маршрут проектирования СБИС. К их числу относятся *Synopsys*, *Cadence Design Systems*, *Mentor Graphics*. На системном этапе формулируются требования к функциональным и схемным характеристикам, разрабатываются алгоритмы, реализуемые в СБИС, и структурные схемы. Алгоритмы обычно представляются на языках проектирования аппаратуры (HDL — *Hardware Description Language*) и выражают поведенческий аспект проектируемого изделия. Основными HDL языками в современных ECAD являются VHDL и Verilog. Поведенческие описания представляют собой исходное задание на функциональное и логическое проектирование. Этапы функционального и логического проектирования поддерживаются в ECAD рядом программ синтеза и моделирования. Одной из наиболее ответственных и трудно формализуемых проектных процедур является блочный синтез, в процессе которого выполняется распределение операций алгоритма по временным тактам

и по функциональным блокам аппаратуры, выбирается тип памяти. Тем самым определяются структура схемы на уровне регистровых передач (RTL — Register Transfer Level), типы блоков (комбинационные или последовательные), реализуются распараллеливание и конвейеризация вычислений. Полученное RTL (описание на языке VHDL) далее преобразуется в вентиляную структуру — модель вентиляного уровня.

Глубокий экономический кризис в России привел к распаду или в лучшем случае к анабиозу активности научных школ и практических работ по проблемам EDA. Однако в последнее время заметно возрождение интереса к развитию высокотехнологичных производств и, как следствие, к использованию EDA.

За истекшее десятилетие индустрия EDA за рубежом продвинулась далеко вперед. Сейчас разработка САПР для отдельных предприятий силами самих предприятий оказывается малоперспективной. Рынок ECAD насыщен разнообразными прикладными средствами проектирования, и можно получить надежную САПР с достаточной функциональностью и с гораздо меньшими временными затратами, купив соответствующие программные продукты у фирм, специализирующихся на производстве средств САПР. Службы САПР на предприятиях могут учесть местные специфические требования путем адаптации приобретаемых средств и разработки дополнительных программ, используя инструментальные среды типа CAS.CADE [10], созданные для САПР в машиностроении, или CASE-средства типа упомянутой выше DSS. Однако имеющиеся на рынке средства САПР довольно дороги. Кроме того, следует учитывать тот факт, что для наиболее наукоемких и стратегически важных направлений средства проектирования на рынок не выставляются, поэтому соответствующие зарубежные средства для российских предприятий оказываются недоступными. В то же время без автоматизации проектирования не удастся достичь успеха в создании сверхсложных будущих систем в многокристальном или типа «система на кристалле» исполнении, при объединении электрических оптических, механических и, возможно, биологических элементов в развивающихся микросистемных проектах. В этих условиях, чтобы оставаться технологически высокоразвитой страной, России нужны собственные центры развития ECAD.

Основные направления развития инфраструктуры разработок сложнофункциональных специализированных СБИС, в том числе типа СнК, представлены в табл. 1.

Таким образом, EDA индустрия развивается с учетом требований нанометровых технологий и методологии проектирования «система на кристалле». Развитие САПР для системного проектирования, проектирования схем малой мощности, проектирования с учетом требований производства, интеграции систем является важнейшей задачей, требующей решения в ближайшее время.

Задача развития инфраструктуры проектирования сложнофункциональных изделий микроэлектроники в определенной степени решалась при формирова-

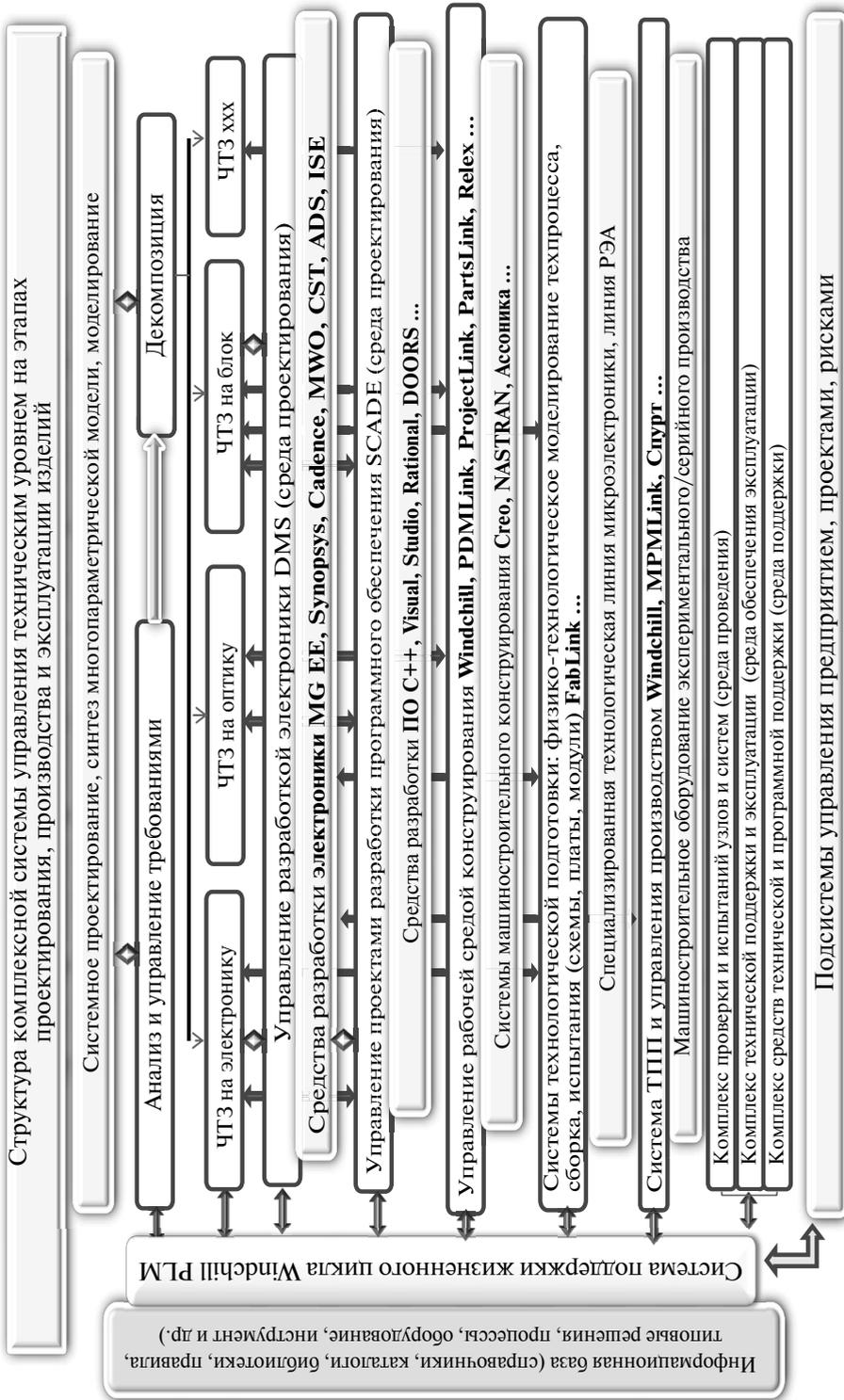


Рис. 1. Структура комплексной системы управления техническим уровнем сложнотехнологических микроэлектронных систем на этапах проектирования, производства и эксплуатации изделий

Уровень проектирования	Структуры проектирования	
Аппаратура и системы (РЭС и ИТКС)	Комплекс дизайн-центров проектирования системного уровня по направлениям: радиопром, судпром, авиапром, ракетно-космическая техника, аппаратура систем управления спецбоеприпасов, ТЭК, информсвязь, защита информации (ФСБ, федеральные органы связи), ВВСТд	
Элементная база	Направления	Структуры
	Микроэлектронная техника: проектирование СнК, твердотельная СВЧ электроника	МЦСП, Центры проектирования СнК, узлов и блоков аппаратуры и систем
	Дискретная электроника: САПР оптоэлектроники (когерентной и некогерентной), акусто- и магнитоэлектроники, инфракрасной техники, устройств отображения информации, полупроводниковых и пассивных компонентов	Распределенная САПР дискретных электронных компонентов
<b>Международное партнерство</b>		
Промышленное производство элементной базы	<p>Микроэлектронная техника</p> <div data-bbox="600 1130 860 1230" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px 0;">Зарубежные «кремниевые» мастерские</div>	<div data-bbox="880 1070 1141 1343" style="border: 1px solid black; padding: 5px;">Отечественные фабрики: Микрон, IX1, линия РС СБИС. Межотраслевой центр проектирования, каталогизации и изготовления фотошаблонов, новые линии РС СБИС (Росэл, НИИИС)</div>
	<p style="text-align: center;">Дискретная электроника</p> <div data-bbox="600 1412 860 1561" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px 0;">Зарубежные фирмы — поставщики электронных компонентов, в том числе совместные</div>	

Рис. 2. Трехуровневая система проектирования и изготовления РЭА и ЭКБ

нии федеральной целевой программы «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008—2015 годы [11], которая стала дальнейшим развитием работ по подпрограмме развития ЭКБ в рамках федеральной целевой программы по развитию национально-технологической базы.

К ведущему направлению в области электроники относится субмикронная сложнофункциональная микроэлектроника. Переход к инновационному разви-

**Таблица 1.** Основные направления развития инфраструктуры проектирования специализированных сложнофункциональных СБИС

Инфраструктура 80-х годов	Инфраструктура 90-х годов	Современная инфраструктура
Отечественная Би и КМОП технология 2 мкм	Отечественная Би и КМОП технология 1,2 мкм	Отечественная Би, БиКМОП, КМОП технология 0,35—0,5 мкм
	Доступ к зарубежной технологии 0,5—0,8 мкм самостоятельно отдельными предприятиями	Планируемый в интересах большинства предприятий доступ к зарубежной технологии 0,18—0,25 мкм
Разработка схемотехники ASIC на основе цифровых БМК силами разработчиков аппаратуры (или специализированных подразделений) с оформлением карт заказа. Порядок регламентирован ГОСТ 27394 (разработан при участии автора)		→
	Сформированы центры проектирования СБИС, оснащенные современным лицензионным САПР (в основном CADENCE), позволяющие проектировать заказные СБИС по методу стандартных ячеек (библиотек микроблоков)	→
Полупроводниковые предприятия предоставляют библиотеки микроэлементов для БМК, изготавливают ASIC		→
		В части ASIC типа «система на кристалле» становятся «кремниевыми мастерскими», разрабатывают и представляют в Центры проектирования в первую очередь микробиблиотеки стандартных цифровых элементов и правила проектирования аналоговых узлов

Таблица 1. (продолжение)

Инфраструктура 80-х годов	Инфраструктура 90-х годов	Современная инфраструктура
Библиотеки аттестовывались для отдельных БМК		→
	Начаты работы по аттестации библиотек стандартных микроэлементов заказных ASIC	Создается и согласовывается с предприятиями — разработчиками аппаратуры по Госзаказу и утверждается пополняемый каталог библиотек стандартных микроэлементов различных отечественных и зарубежных изготовителей
	Встроенные блоки памяти разрабатываются «вручную» предприятиями-изготовителями	На предприятиях-изготовителях разрабатываются программно-компилируемые СФ-блоки, встраиваемые в ASIC — ОЗУ, ПЗУ и др.
	Центры проектирования каждый по-своему усмотрению выбирал библиотеки зарубежных фирм	Формируется система центров, работающих с зарубежными библиотеками, и перечень (пополняемый) зарубежных фирм, с которыми будут проводиться работы по изготовлению ASIC по Госзаказу, централизовано разрабатываются библиотеки 0,18—0,25 мкм и менее для заказа схем у зарубежных изготовителей
Создавался научный потенциал разработок отдельных узлов аппаратуры: предприятиями — изготовителями ASIC узлов общего применения (сигнальных процессоров, микропроцессоров, АЦП, ЦАП и др.), предприятиями — разработчиками аппаратуры специализированных узлов связи, вычислительной техники и т. д.		→
	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Узлы интеллектуальной собственности не были доступны разработчикам</div>	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: flex-start;"> <div style="margin-bottom: 20px;"> <p>Создаются СФ-блоки встроенных узлов общего применения</p> </div> <div style="margin-bottom: 20px;"> <p>Создаются СФ-блоки специализированной обработки сигналов</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> <p>Формируется отечественный фонд СФ-блоков коллективного пользования</p> </div> </div>

Таблица 1. (окончание)

Инфраструктура 80-х годов	Инфраструктура 90-х годов	Современная инфраструктура
В процессе разработки ASIC участвовали две стороны: разработчик аппаратуры и предприятие-изготовитель	<p>-----</p> <p>Сформировался маршрут разработки, включающий три стороны:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• разработчик аппаратуры (централизованно);</li> <li>• специализированный Центр проектирования СБИС;</li> <li>• предприятие-изготовитель (отечественный или зарубежный)</li> </ul>	<p>→</p> <p>Сохраняется в первую очередь для ASIC на основе БМК</p> <p>-----</p> <p>→</p> <p>Направление будет преобладать из-за схемотехнических проблем специализированной части ASIC «система на кристалле», усложнения многоколлективной разработки СБИС</p>
Использовался отечественный и нелицензионный зарубежный САПР проектирования схемотехники и топологии ASIC на БМК	<p>-----</p> <p>На аппаратурных предприятиях в связи с использованием ПЛИС появились элементы системного моделирования</p> <p>-----</p>	<p>→</p> <p>-----</p> <p>→</p> <p>Основным будет маршрут единого системного, схемотехнического и топологического проектирования на базе лицензионных программных средств Центров проектирования</p>

тию экономики страны во многом будет определяться успешным решением задач по развитию именно этого направления электроники. Субмикронная микроэлектроника, являясь на сегодня аккумулятором всех новых достижений в системах автоматизированного проектирования, математическом моделировании, материаловедении, технологии и метрологии, ускоренными темпами продвигает человечество к новому электронному обществу. Важнейшую роль эта сфера электроники играет в реализации задач обеспечения технологической независимости страны, повышения ее обороноспособности для защиты наших национальных интересов. Мировая микроэлектроника достигла высочайшего уровня технологической сложности и позволяет изготавливать изделия, содержащие в кристалле десятки и сотни миллионов транзисторов при технологических нормах 45 нм, достигнуты первые результаты для 32 и 22 нм.

Ускоренными темпами проводятся работы в области технологии уровня менее 22 нм. При этом задача достижения такого уровня развития стоит и перед отечественной микроэлектроникой.

Эта задача сравнима по значимости и сложностям с реализацией проектов по созданию атомной бомбы и ракетно-космической техники. Затраты на создание инфраструктуры и развитие этого направления составляют многие миллиарды долларов.

Создание современных и конкурентоспособных микроэлектронных систем является универсальной и многоплановой дисциплиной, объединяющей в себе методы оптимизации развития технического уровня СБИС на основе проектирования законченных аппаратно-программных блоков с применением встраиваемых СБИС типа «система на кристалле», построенных с использованием сложных функциональных блоков (стандартных процессоров и процессорных ядер, встроенного программного обеспечения, интерфейсных ядер, ядер цифро-аналоговых и аналого-цифровых преобразований, ядер схем памяти, интерфейса и др.). В общем случае современная и конкурентоспособная микроэлектронная система включает в себя различные типы устройств (узлов), спроектированных в виде СБИС типа «система на кристалле».

Управление техническим уровнем в микроэлектронике как важнейшая функция системы управления качеством является многофакторной задачей, в которой тесно переплетаются научно-технические, технико-экономические, физико-технологические, конструктивно-схемотехнические и другие не менее существенные аспекты проблематики [12]. Это определяет актуальность обеспечения эффективности научно-методических принципов управления, решения возникающих задач оптимизации исследований, разработок, производства, эксплуатации (по этапам жизненного цикла) изделий.

К основным принципиально значимым задачам в области управления техническим уровнем микроэлектроники относится обеспечение наивысшей технико-экономической эффективности при применении создаваемых электронных изделий в конечной продукции — РЭА, РЭСВ, ИТКС, определяющей тактико-технические характеристики образцов ВВСТ. Эта эффективность в первую очередь определяется важнейшими показателями технического уровня, необходимость достижения которых, в том числе с применением методов контроля и мониторинга, — важнейший принцип, определяющий содержание и задачи развития микроэлектронных систем.

К ним относятся:

- управление уровнями микроминиатюризации (микроминиатюризация на основе применения сложнофункциональных микроэлектронных систем, систем с объемной интеграцией с вертикальным межсоединением кремниевых кристаллов, многокристальных сборок и др.);
- технология и инфраструктура;

- физико- и конструктивно-технологическое обеспечение создания и функционирования радиоэлектронных изделий с высоким уровнем технических параметров по базовым (прорывным) направлениям развития электронной техники;
- системо- и схмотехническая интеграция и оптимизация (например, СБИС типа «система на кристалле» на основе СФ-блоков);
- предельнодостижимые и реализуемые литографические рубежи [13].

Анализ развития процесса микроминиатюризации радиоэлектронных устройств и вычислительной техники показывает, что микроэлектронная и микросистемная техника стали важнейшими элементами этого процесса на системном уровне.

Общая задача многофункциональных военно-технических систем, продукции двойного назначения базируется на революционном решении проблем на уровне кристалла, который объединяет гетерогенную интеграцию трех (технологически и функционально интегрированных) основных информационных технологий — микроэлектроники, фотоники и микроэлектромеханических систем.

Содержательная часть интегрированной электронной системы опирается на объединение:

- сенсорных систем с высокой чувствительностью в области радиочастотного и оптического сигналов;
- более развитого сигнального процессора, способного выделить нужный сигнал на фоне различных внутренних и внешних помех;
- высокоэффективных коммуникационных систем (особенно с позиции надежной полосы пропускания);
- интеллектуальных, интегрированных на уровне кристалла (chip-scale) микросистем, способных преобразовать в реальном времени сложные сигналы внешней информации в необходимую реакцию.

Общая тенденция микроминиатюризации решается за счет не только минимизации одного размера, но и более полного использования объема. К таким направлениям относятся системы на кристалле ( $S_0C$ ) и модульные конструкции (системы в корпусе SiP).

Для отечественной промышленности необходимо сконцентрировать как организационные, так и финансовые ресурсы на создании наиболее рациональной номенклатуры таких схем, покрывающих наибольшее число задач перспективной аппаратуры, а также решить комплексную задачу создания и освоения перспективной технологии проектирования и изготовления СБИС, в том числе типа «система на кристалле».

Методологии построения инновационной инфраструктуры проектирования и изготовления сложнофункциональных СБИС в целостном виде до данной работы не было. Отдельные вопросы рассматриваемой методологии разрабатывались

на ряде предприятий электронной отрасли, в том числе в ведущих дизайн-центрах проектирования СБИС [15—30].

Теоретические основы и практические методы организации сквозного проектирования сложнофункциональных СБИС субмикронного технологического уровня в виде ключевых принципов и определение приоритетных направлений их развития находятся сегодня в центре внимания научной общественности, руководителей и специалистов отечественных предприятий и организаций. Разработке обстоятельного и систематизированного представления об инфраструктуре проектирования и изготовления таких изделий, государственном регулировании и поддержке, особенностях соответствующего мирового опыта и его адаптации к российским условиям посвящены работы ряда отечественных ученых [20, 23, 31—37].

В настоящей монографии изложен системный подход и основные научно-технические проблемы в данной области на основе результатов ряда научно-исследовательских работ [38—46], разработаны основные принципы и методы управления техническим уровнем при реализации системной организации по проектированию, моделированию и технологическому обеспечению изготовления СБИС типа «система на кристалле» и увязаны в единое целое в виде концепции построения инфраструктуры сквозного проектирования сложнофункциональных СБИС от системного уровня до топологии кристалла, выбора технологического базиса для изготовления СБИС с учетом обеспечения специальных требований по радиационной стойкости, организации процесса изготовления фотошаблонов и микросхем, в том числе на зарубежных фабриках, последующего их тестирования, сборки, испытаний и применения [43—47].

Разработанные методики позволили сформировать законченную методологию создания проектно-технологических основ развития сложнофункциональных изделий микроэлектроники как систему принципов и нормативных регламентов.

Для достижения целей, определенных «Основами политики Российской Федерации в области развития электронной компонентной базы на период до 2010 года и дальнейшую перспективу», утвержденными Президентом Российской Федерации, задач комплекса федеральных целевых программ разработаны принципы и методы управления техническим уровнем разработок и производства сложнофункциональных изделий микроэлектроники, включающие в том числе наличие отечественной интегрированной инфраструктуры с центрами проектирования (дизайн-центры), центр коллективного пользования для заказного изготовления фотошаблонов, технологические линейки субмикронного уровня и др.

Актуальность данной работы связана с необходимостью повышения технического уровня высокоинтегрированной микроэлектроники на основе ускоренного развития отечественной инфраструктуры разработки аппаратурно-ориентиро-



ванных сложнофункциональных изделий типа «система на кристалле», освоения технологии сложнофункциональных радиационнотойких схем, развертывания работ по их проектированию и внедрению для обеспечения тактико-технических требований перспективных средств вооружения и аппаратуры общепромышленного назначения.

В настоящее время находит все более широкое признание положение о том, что рационально организованная система проектирования сложнофункциональных изделий микроэлектроники способна вывести эту отрасль из сложившегося тупика и внести значительный вклад в столь необходимое динамичное развитие как самой микроэлектроники, так и экономики всей страны. Внимание государства и общества в целом к проблемам микроэлектроники свидетельствует об актуальности тематики исследований, посвященных разработке методов рационализации систем управления и планирования развития этой отрасли.

Сформировалась настоятельная потребность в научном осмыслении новых явлений и процессов в данной сфере, разработке адекватных сложившимся реалиям методов организации деятельности дизайн-центров, изготовителей и заказчиков микроэлектронных изделий. Данная научно-практическая проблема, которая является по своему значению фундаментальной для развития всей отечественной микроэлектроники и ее взаимодействия с реальным сектором экономики, должна решаться на базе всей совокупности теоретических знаний и накопленного практического опыта, в том числе международного. Среди работ зарубежных ученых и практиков, посвященных различным аспектам рассматриваемой темы, наиболее значимыми можно назвать труды таких авторов, как Ф. Томас, Г. Мартин, Г. Чанг и др. [18, 24, 30, 48].

Российские ученые также активно осуществляют разработку методов организации инфраструктуры проектирования, изготовления и применения микроэлектронных изделий на основе технологии типа «система на кристалле», управления и организации работ в этой сфере деятельности [15, 16, 49—58].

Цель исследования состоит в разработке научно-методических принципов управления техническим уровнем высокоинтегрированных электронных систем и обеспечении их реализации в реальных условиях организации инновационных проектно-технологических процессов и эксплуатации (в том числе специальных воздействий среды) и соответственно в развитии методологии создания проектно-технологического базиса субмикронных СБИС высшего мирового уровня как системы научно- и организационно-методических положений и нормативно-технических руководств различных иерархических уровней управления и комплекса физико-технических основ, проектно-технологических процессов.

Цель исследования определила необходимость постановки и решения следующих основных задач по базовым научно-техническим направлениям, к которым относятся:

- алгоритмы и научно-методическое обеспечение управления техническим уровнем СнК (SoC) новых поколений, развития системного проектирования;
- проблемы управления, задачи физико-технической, технико-экономической, нормализационной регламентации и оптимизации применения ЭКБ (в том числе зарубежных);
- алгоритмы, физико-техническое, нормализационное обеспечение технического уровня электронных средств в условиях специальных воздействий.

Создание целостной методологии построения и развития концепции сквозного системного проектирования СБИС, включает:

- 1) разработку общей концепции, определяющей порядок и инфраструктуру отечественных разработок нового поколения субмикронных СБИС повышенной функциональной сложности, полностью реализующих отдельные законченные узлы аппаратуры;
- 2) разработку новой методологии заказного проектирования СБИС, основанной на применении повторно используемых библиотек микро- и макроблоков (сложных функциональных блоков);
- 3) разработку принципов выбора сложнофункциональных блоков, используемых при проектировании СБИС типа «система на кристалле»;
- 4) разработку алгоритмов взаимодействия различных предприятий (аппаратурных, Центров проектирования СБИС, «кремниевых мастерских», предприятий и отдельных специалистов, обладающих интеллектуальной собственностью на СФ-блоки), участвующих в процессе создания СБИС.

В области теории и практики организации процесса проектирования и изготовления СБИС решались следующие задачи:

- 1) разработка организационно-технических мероприятий по аттестации маршрута разработок СБИС, выполняемых коллективами различных предприятий, а также оформления и аттестации используемых при разработках СБИС СФ-блоков различных предприятий;
- 2) разработка и выпуск периодического информационного бюллетеня в качестве методического пособия для конструкторов аппаратуры по проектированию и применению в РЭА СБИС типа «система на кристалле» и информационно-аналитической базы;
- 3) решение проблемы унификации СБИС и благодаря этому затрат на создание, эксплуатацию специальной техники и решение проблемы импортозамещения. При этом с необходимостью обеспечиваются требования по радиационной стойкости таких СБИС;
4. решение проблемы создания и развития отечественного производства радиационно-стойкой ЭКБ путем сосредоточения усилий на освоении технологий изготовления интегральных схем на структурах «кремний на сап-

фире» (КНС) и «кремний на изоляторе (КНИ) по КМОП- (а в перспективе и БиКМОП-) маршруту.

В области методологии становления и развития проектно-технологических платформ СБИС решались задачи:

- 1) создание научно-технологического задела для отечественной технологии изготовления структур КНС с толщиной слоя кремния 0,1 мкм на базе исходных структур КНС с толщиной слоя кремния 0,3 мкм;
- 2) разработка методов моделирования транзисторных КНС-структур;
- 3) разработка проектных предложений для технологического процесса изготовления КМОП схем на основе КНС-структур;
- 4) разработка технических требований к технологическим операциям изготовления КМОП схем на основе КНС-структур;
- 5) разработка правил проектирования для технологического процесса изготовления КМОП схем с субмикронными проектными нормами;
- 6) разработка основных требований к составу нормативно-технической документации для проектирования и производства СБИС типа «система на кристалле»;
- 7) разработка требований к проектно-технологическим платформам изготовления СБИС для космических аппаратов с длительными сроками активного существования.

Предметом исследования является научно-теоретическое и практическое содержание процесса и функций различных этапов и методов проектирования и изготовления СБИС, являющихся ключевыми для организации отечественной инфраструктуры развития микроэлектроники.

Объектом исследования является инновационный сектор функционально-сложной микроэлектроники России в его объективно обусловленной связи с радиоэлектроникой и информационными технологиями в целом.

Теоретическую и методологическую основу исследования составили обоснованные в трудах отечественных и зарубежных авторов принципиальные положения и выводы, которые охватывают широкий круг взаимосвязанных проблем и получены как в рамках общественных наук (социология, теория управления, теория денежного обращения и др.), так и в рамках теории исследования операций, кибернетики и информатики, а также финансового менеджмента.

Информационно-аналитическую базу исследования составляют российская и зарубежная монографическая литература, публикации в периодической печати, нормативные документы предприятий — разработчиков микросхем, в том числе руководящие документы по процедурам проектирования СБИС типа «система на кристалле» на основе сложнофункциональных блоков, а также материалы и документы корпоративных структур. В ходе исследования изучены общая и специальная литература, законодательные и другие нормативные акты, реко-

мендации отечественных и зарубежных исследователей в области проектирования и изготовления сложнофункциональных изделий микроэлектроники [5, 6, 11, 25, 59—66]. Используются также собственные аналитические разработки авторов, в том числе опубликованные в научных и научно-технических изданиях.

Получены новые научные результаты, имеющие важное значение для развития инновационной деятельности в области разработки и применения сложнофункциональных микроэлектронных систем в аппаратуре различного назначения.

1. Впервые разработаны научно-методические принципы и основы системы управления техническим уровнем сложнофункциональных микроэлектронных систем и их реализация в проектно-технологических процессах на этапах жизненного цикла.
2. Научно обоснована идентификация ключевых положений системы управления (с точки зрения влияния на развитие инноваций российской экономики) техническим уровнем в интересах корпоративных структур, входящих в контур процессов создания и применения сложнофункциональных изделий микроэлектроники (дизайн-центров, аппаратурных предприятий, изготовителей, заказчиков), взаимодействие которых является важным элементом структурной перестройки отечественной электроники. Исследование динамики развития технического уровня процессов проектирования и изготовления сложнофункциональных изделий микроэлектроники позволяет учитывать эволюцию и механизмы как для решения задач рационального сочетания возможного участия каждой структуры в общем процессе, так и для целей планирования развития и регулирования их деятельности со стороны государства.
3. Разработана концепция становления и развития технического уровня и качества процесса создания сложнофункциональных изделий микроэлектроники (дизайн-центров, аппаратурных предприятий, изготовителей изделий) на основе рационального построения принципов и способов организации данной деятельности:
  - разработаны методологические основы инфраструктуры создаваемой системы сквозного проектирования СБИС и формирования рациональной структуры ее элементов, позволяющие рассматривать систему как объект управления, который может быть спроектирован или перепроектирован в соответствии с инженерными принципами;
  - разработана и обоснована концепция инфраструктуры системы применительно к современным задачам развития технического уровня сложнофункциональных изделий микроэлектроники.
4. Обоснованы методы и разработано репрезентативное множество операционных бизнес-схем организации взаимодействия субъектов системы,

которые образуют в совокупности инструментальное обеспечение процесса управления деятельностью отечественных структур при разработке сложнофункциональных изделий микроэлектроники. Операционные бизнес-схемы организации взаимодействия субъектов системы позволяют определять рациональные сочетания и определенные ограничения их деятельности еще на стадии разработки этих схем, эффективно обеспечивать требуемый уровень качества.

5. Уточнены и развиты сложившиеся в электронной отрасли представления о базовых понятиях таких специфических предметных областей, как процессы проектирования и изготовления сложнофункциональных изделий микроэлектроники. Введение понятий «проектно-технологическая платформа» как проектного и технологического базиса и «системная триада» как основы взаимодействия заказчика и исполнителя, которые позволяют уточнить содержание процедур и технологий и классифицировать эти технологии и технический уровень изделий.
6. Сформулирована и научно обоснована совокупность принципов функционирования и развития инфраструктуры проектирования и изготовления сложнофункциональных изделий микроэлектроники, открывающая возможности для адаптации и развития системы управления техническим уровнем в условиях динамично развивающихся процессов создания сложнофункциональных изделий микроэлектроники.

Разработана концепция инновационного развития системы, которая заключается в реинжиниринге отдельных процессов и применении принципов реинжиниринга для устранения наиболее существенных недостатков иерархических связей в системе, что наиболее актуально для развития технического уровня и обеспечения качества.

7. Разработаны новые подходы к управлению системой, позволяющие на практике реализовать принципы ее функционирования и развития. Особое значение в этом плане имеет обоснование автором: 1) классификации аналитических задач, решаемых в интересах управления системой; 2) методики оценки эффективности деятельности системы. Разработанные подходы развивают сложившиеся в настоящее время в науке и практике методы оценки и анализа эффективности деятельности структурных образований типа заказчик — разработчик — изготовитель.
8. Разработаны механизмы реализации принципа партнерских отношений участников процесса создания сложнофункциональных изделий микроэлектроники, которые, по мнению автора, будут определять облик перспективных технологий. Сущность данного партнерства заключается в организации деятельности формируемой системы на основе глубокого изучения существующих и потенциальных проблем каждого участника

процесса и в предоставлении им более рациональных по сравнению с известными ему способами методов их решения. Принцип партнерства позволяет разрабатывать стратегии совместной деятельности участников процесса на различных этапах общего процесса проектирования и изготовления сложнофункциональных изделий микроэлектроники требуемого технического уровня и качества.

9. Сформулирована концепция разработки системы проектирования и изготовления сложнофункциональных изделий микроэлектроники требуемого технического уровня, включающая:
  - а) концептуальные положения по формированию организационной структуры системы;
  - б) концептуальные положения по разработке системы планирования и регламентации деятельности участников системы;
  - в) экспертные рекомендации по разработке стратегии развития системы в целях достижения требуемого технического уровня изделий и обеспечения их качества.
10. Разработаны, систематизированы и описаны основы процессов:
  - формирования многоуровневой структуры бизнес-единиц системы по проектированию и изготовлению сложнофункциональных изделий микроэлектроники;
  - повторного использования при проектировании СБИС типа «система на кристалле» аттестованных сложнофункциональных блоков;
  - создания межотраслевого электронного каталога СФ-блоков, порядка доступа и правил пользования содержащейся в нем информацией.
11. Разработаны и реализованы базовые для управления техническим уровнем:
  - методология проектирования СБИС типа «система на кристалле»;
  - методические основы взаимодействия аппаратурных предприятий, центров проектирования и изготовителей при разработке СБИС типа «система на кристалле»;
  - методические основы по определению степени применимости СФ-блоков;
  - методология выбора сложнофункциональных блоков по функциональному составу и характеристикам для построения СБИС типа «система на кристалле» различного аппаратурного применения.

Разработанные методики предназначены для выявления как имеющегося потенциала, так и динамики потенциально интегрированной деятельности субъектов системы.

Научное значение работы заключается в разработке научно-методических принципов системы управления техническим уровнем, теоретико-методологических и методических положений и путей реализации, которые представля-



ют собой научный и организационно-методический аппарат, предназначенный для использования отечественными корпоративными структурами при создании рациональных систем взаимодействия в процессе создания сложнофункциональных изделий микроэлектроники.

Практическое значение результатов и выводов исследования определяется тем, что, во-первых, разработанная концепция построения сквозной системы проектирования сложнофункциональных изделий микроэлектроники высокого технического уровня в современных российских условиях обосновывает необходимость и возможность значительных позитивных изменений в развитии отечественной микроэлектроники, создает методологическую базу для проведения комплекса мероприятий, обеспечивающих более устойчивое развитие этого направления микроэлектроники, выход на качественно новый уровень, во-вторых, содержат пакет методических рекомендаций по развитию инфраструктуры проектирования и изготовления сложнофункциональных изделий микроэлектроники, совершенствованию процедур и технологий организации работы отечественных дизайн-центров, аппаратурных предприятий и изготовителей изделий.

Сформулированные в работе автора положения и рекомендации предназначены для использования отечественными участниками процесса проектирования и изготовления сложнофункциональных изделий микроэлектроники и позволяют решать практические задачи стратегии и тактики развития микроэлектроники как базовой инновационной экономики страны. Они представляют собой практическое пособие по совершенствованию организационных процессов проектирования и изготовления сложнофункциональных изделий микроэлектроники, включая технологии организационного процесса и функционально-технологического проектирования, и в этом качестве предназначены для использования руководителями и специалистами отечественных предприятий и структур. Они также могут использоваться органами государственного и регионального управления в работе с предприятиями, направленной на развитие этого направления микроэлектроники.

Результаты работы внедрены в научно-практическую деятельность, проектно-технологические процессы на ведущих предприятиях и организациях радиоэлектронной отрасли (ОАО «Росэлектроника», ФГУП «НИИМА «Прогресс», ОАО «ОТИК», ОАО «НПП «Восток», ОАО «НЗПП с ОКБ», ФГУП «НИИЭТ», ОАО «Светлана-полупроводники», ОАО «Оптрон», ОАО «НПП «Пульсар», ОАО «ГЗ «Пульсар», ОАО «Омский НИИ приборостроения», ОАО «НИИ телевидения» и др.), в том числе при реализации инвестиционных проектов:

- создание высокотехнологичного научно-производственного комплекса межотраслевого центра проектирования, каталогизации и изготовления фотошаблонов для производства СБИС с проектными нормами 0,18–0,13 мкм, г. Москва (Зеленоград), ОАО «Росэлектроника», 2008–2010 гг.;

- техническое перевооружение производства специальных СБИС с топологическими нормами 0,25—0,35 мкм, ОАО «Росэлектроника», 2011—2013 гг.;
- техническое перевооружение базового центра испытаний и сертификации ЭКБ, в том числе иностранного производства, для обеспечения надежности РЭА приоритетных комплексов и систем ВВСТ, ОАО «Росэлектроника», 2012—2013 гг.;
- техническое перевооружение в целях создания дизайн-центра и производственно-технологического комплекса для разработки и серийного производства планарных высокоинтегрированных кластерных АФАР на базе 3D технологии и ЛТСС керамики для бортовой и наземной аппаратуры, ОАО «Росэлектроника», 2012—2013 гг.

По результатам работы сформированы основные положения и мероприятия по реализации важнейших научно-методических и организационно-технических директивных документов различного иерархического уровня — от федерального до межотраслевого и отраслевого в части высокоинтегрированных систем, в том числе:

«Основ политики Российской Федерации в области развития электронной компонентной базы на период до 2010 года и дальнейшую перспективу»;

Федеральных целевых программ «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008—2015 годы и «Развитие оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации» на 2011—2020 годы, в том числе «Подпрограммы создания электронной компонентной базы для систем, комплексов и образцов ВВСТ»;

Межведомственной целевой программы разработки и производства радиационностойкой электронной компонентной базы, 2008 г.;

Решений научно-технического совета Военно-промышленной комиссии при Правительстве Российской Федерации по вопросам обеспечения радиационной стойкости электронной компонентной базы для ракетно-космической техники, Москва, 2008—2009 гг.

Стратегии развития ОАО «Росэлектроника» до 2025 года.

Основные положения монографии:

1. Концептуальные положения, научные и организационно-методические принципы, комплексное алгоритмическое обеспечение для решения задач в области сложнофункциональной микроэлектроники высокой степени интеграции.
2. Методология создания сложнофункциональных изделий микроэлектроники высокой степени интеграции (СБИС типа «система на кристалле») для высокоинтегрированных электронных систем перспективного технического уровня.



3. Положения по структурированию процессов разработки и применения сложнофункциональных изделий микроэлектроники высокой степени интеграции по основным архитектурно-иерархическим уровням (электронные компоненты, аппаратура, системы) и этапам жизненного цикла от поисковых исследований до разработки и применения в сферах эксплуатации, в том числе на основе:
  - метода оптимизации номенклатуры сложнофункциональных блоков;
  - алгоритмов определения предельно достижимых значений и физико-технологических ограничений развития существующих и новых принципов построения сложнофункциональных изделий микроэлектроники высокой степени интеграции;
  - определения ограничений на параметры моделей поведения сложнофункциональных изделий микроэлектроники высокой степени интеграции типа «система на кристалле» и соответствия критериям работоспособности на выделенных уровнях иерархии построения СБИС.
4. Развитие методологической основы современных технологий проектирования сложнофункциональных изделий микроэлектроники высокой степени интеграции типа «система на кристалле» — структурных принципов формализации процессов проектирования с использованием моделей сложнофункциональных блоков. Базовыми элементами представляемой системной методологии проектирования СБИС типа «система на кристалле» являются принципы структурно-функционального подхода.
5. Комплекс структурно-схемотехнических, конструктивно-технологических и аппаратно-алгоритмических методов повышения функционально-параметрических запасов работоспособности и надежности СБИС, основанный на использовании многопараметрической оптимизации структурных решений для реализации критериальных ограничений на параметры объектов системного описания проектируемых СБИС.
6. Результаты экспериментального исследования параметров элементной базы СБИС на структурах «кремний на изоляторе».
7. Разработанные основы создания технологии структур кремния на сапфире с ультратонкими слоями кремния для построения специализированных сложнофункциональных изделий микроэлектроники высокой степени интеграции.
8. Разработанная методология управления техническим уровнем на базе комплекса (системы) инженерно-физических и нормативно-технических регламентаций:
  - различных управленческо-иерархических уровней — федерального, межотраслевого, отраслевого, корпоративного, НИИ, КБ, завод и другой научно-технической документации. («Основы политики Российской

Федерации в области развития электронной компонентной базы на период до 2010 года и дальнейшую перспективу», утвержденные Президентом Российской Федерации, концепции, структура и содержание программных мероприятий профильных федеральных целевых программ, стратегия развития радиоэлектронной отрасли до 2025 года, директивные и прочие управленческие регламенты, основные положения содержания комплексов и блоков НИОКР, реализуемых автором инвестиционных проектов по техническому перевооружению предприятий отрасли);

- архитектурно-иерархических по этапам жизненного цикла от создания и применения электронных компонентов до радиоэлектронной аппаратуры и систем.
9. Содержание и результаты реализации разработанных принципов и методов в практике проектно-технологических процессов.