Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Научно-исследовательский институт системных исследований РАН

ТРУДЫ НИИСИ РАН

ТОМ 4 N 1

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ:

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ

МОСКВА
2014

Редакционный совет НИИСИ РАН:
В.Б. Бетелин (председатель),
О.М. Белоцерковский, Е.П. Велихов, В.А. Галатенко, В.Б. Демидович (отв. секретарь),
Б.В. Крыжановский, А.Г. Кушниренко, А.Г. Мадера, М.В. Михайлюк, В.Я. Панченко,
В.П. Платонов, В.Н. Решетников

Главный редактор журнала:
В.Б. Бетелин

Научные редакторы номера:
Е.П. Волошина, А.Г. Мадера

Тематика номера:
Математическое и компьютерное моделирование,
моделирование, технология, производство в микро- и наноэлектронике,
информационные технологии

Журнал публикует оригинальные статьи по следующим областям исследований: математическое и компьютерное моделирование, обработка изображений, визуализация, системный анализ, методы обработки сигналов, информационная безопасность, информационные технологии, высокопроизводительные вычисления, оптико-нейронные технологии, микро- и наноэлектроника

The topic of the issue:
Optical-neural technologies, modeling and information technologies

The Journal publishes novel articles on the following research arias: mathematical and computer modeling, system analysis, image processing, visualization, signal processing, information security, information technologies, high-performance computing, optical-neural technologies, micro- and nanoelectronics

Заведующий редакцией: Ю.Н. Штейников

Издатель: Российская академия наук, НИИСИ РАН,
117218, Москва, Нахимовский проспект 36, к. 1

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, 2013 г.

СОДЕРЖАНИЕ

I. МОДЕЛИРОВАНИЕ, ТЕХНОЛОГИЯ, ПРОИЗВОДСТВО В МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ

А.В.Аникин, С.В.Дёмин, А.А.Столяров. Проблемы разработки и реализации базовых технологических процессов на технологическом комплексе НИИСИ РАН 4

С.А.Морозов, С.А.Соколов, А.С.Фирсов, М.Г.Чистяков. Конструктивно-технологический базис библиотеки элементов с гарантированным уровнем радиационной стойкости не менее 1 Мрад 17

С.А.Морозов, С.А.Соколов. Разработка радиационно-стойких микросхем и микромодулей статической памяти 25

К.К.Смирнов, М.Д.Бубнова. Среда для подготовки программ функционального контроля 32

К.К.Смирнов, Е.Н.Ефимов. Организация прослеживаемости предметов труда при проведении функционального контроля СБИС 40

Е.С.Темников. Проблемы проведения контрольных испытаний высокосложных микросхем в условиях мелкосерийного производства 45

Н.Н.Калинина, В.И.Балакирев. Обеспечение одновременного выполнения НИОКР и выпуска СБИС на технологическом комплексе НИИСИ РАН 52

II. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

М.Ж.Акжолов О.А.Дмитриев, И.Г.Лебо, А.Г.Мадера. Сравнение расчётов распространения ударных волн в газах, выполненные по программам ENS и NUT-2D 58

И.Г.Лебо, А.И.Симаков. О численном решении уравнения «конвекция-диффузия» в двумерной постановке 62

С.Г.Вольпин, А.В.Свалов, И.В.Афанаскин, Д.А.Корнаева, А.Р.Саитгареев. Анализ методов интерпретации индикаторных диаграмм для скважин с трещинами гидроразрыва пласта при забойном давлении ниже давления насыщения с помощью численного моделирования ....…...…….. 66

С.Г.Вольпин, Р.М.Кац, И.В.Афанаскин. Использование численного термогидродинамического моделирования для обоснования повышения технологической эффективности метода направленной закачки воздуха .....…. 71

П.В.Крыганов, С.Г.Вольпин, А.В.Свалов, И.В.Афанаскин, Ю.М.Штейнберг. Развитие методов гидродинамических исследований нефтяных пластов и скважин .....…..…….. 80

В.А.Горячев. Некоторые аспекты совершенствования германиевых технологий КМОП ИС…. 86

А.В.Горшков, С.Б.Родин. Численное решение уравнения Озейна, моделирующее обтекание кругового цилиндра 92

III. ИЗ ИСТОРИИ НАУКИ И ТЕХНИКИ

В.М.Тихомиров, В.Б.Демидович. К истории вычислительной математики и программирования: Николай Сергеевич Бахвалов 95

Проблемы разработки и реализации базовых технологических процессов на технологическом комплексе НИИСИ РАН

А.В. Аникин[1], С.В. Демин, А.А. Столяров

1-кандидат технических наук

Аннотация: Изложена обобщенная схема разработки и реализации базовых технологических процессов в условиях реального мелкосерийного производства высокосложных микросхем в НИИСИ РАН. Введены новые технологические и производственные понятия и представлено подробное содержание этапов разработки технологических маршрутов и отдельных операций, приведены примеры правил проектирования и основного средства мониторинга процесса.

Ключевые слова: микросхема, технологический комплекс, проектирование, мониторинг

Введение

Каково происхождение понятия «базовый технологический процесс»? Вопрос можно поставить даже еще шире – почему, по мере усложнения микроэлектронной компонентной базы, оказалась остро востребованной унификация ее технических решений? Что, собственно, вообще означает этот термин, и почему его введение потребовалось спустя почти полвека успешной работы отечественной микроэлектронной промышленности без его использования?

Тому есть сразу несколько взаимосвязанных причин.

Во-первых, непрерывное функциональное и конструктивное усложнение микросхем требует непрерывного же увеличения времени на их разработку при общемировой тенденции на сокращение времени от замысла изделия до его реализации «в кремнии». Тотальная автоматизация процедуры проектирования недостаточна для компенсации такого увеличения, которая возможна только путем изменения фундаментальных подходов к разработке и освоению в производстве новых изделий.

Во-вторых – ограниченность эксплуатационных, в том числе, точностных и надежностных, характеристик контрольно-измерительного и испытательного оборудования, не обеспечивающая условий и режимов проверок, достаточных для полноценной и достоверной гарантии качества готового продукта.

В-третьих, многократное возрастание затрат на проведение традиционного операционного контроля и оценки качества готовой продукции, связанное как с многократным удорожанием контрольно-измерительного и испытательного оборудования, так и с возросшей стоимостью уничтожаемых (в процессе проведения разрушающих проверок и испытаний) полуфабрикатов и готовых изделий.

В-четвертых, ограниченность времени, допустимого для проведения проверок и испытаний каждого типа микросхем, периодом их морального старения (традиционная система проверок производственного процесса изготовления конкретного типа микросхем занимала до двух лет, а партии готовой продукции – еще не менее квартала, что «обеспечивало» падение спроса на эти микросхемы, даже несмотря на гарантированно высокий уровень их качества).

Эти «вызовы» потребовали кардинального пересмотра традиционных взглядов на разработку и производство интегральных микросхем современных поколений и переориентации с итерационного подхода, заключающегося в многоэтапной взаимной отработке конструктивных и технологических проектных решений разрабатываемого изделия к использованию *унифицированных и многократно проверенных ранее* конструктивно-технологических и производственных приемов, позволяющий претворить в жизнь лозунг «*first pass success* - успех с первой попытки», означающий полное исключение из процедуры разработки многочисленных итерационных циклов подгонки и отработки конструктивных узлов изделия, технологического маршрута и параметров, условий и режимов отдельных операций. Этот новый подход включает два взаимосвязанных направления:

- «модульный» (поблочный) подход к разработке технологических процессов изготовления изделий, базирующийся на формировании циклов или блоков технологических операций, характеризующихся завершенностью, определяемой разработчиком, и отличающихся набором входных операционных параметров и выходных характеристик. Данный подход включает тщательную отработку конструктивно-технологических и надежностно-ориентированных решений, единых для широкой номенклатуры изготавливаемых изделий;
- «модульный» подход к проектированию микросхем, включающий ориентацию на преимущественное проектирование заказных и полузаказных изделий на основе тщательно отработанных и верифицированных правил проектирования и библиотек стандартных элементов, жестко согласованных с ранее разработанными и охарактеризованными технологическими процессами, также нацеленный на применение только «надежных» технических решений.

Реализация в микроэлектронном производстве первого направления и обеспечила, собственно, появление слогана «базовый технологический процесс». Стратегия и опыт работы на технологическом комплексе НИИСИ РАН в этом направлении и составили предмет настоящей статьи.

Вообще говоря, само понятие «базовый технологический процесс» гораздо шире, собственно, технологии обработки кремниевой пластины и включает в себя:

- саму обработку (последовательность технологических и контрольных операций, их параметры, условия и режимы, а также конкретные производственную среду, материалы и средства технологического оснащения) – *базовый технологический маршрут*;

- совокупность норм, ограничений, правил и процедур, соблюдение которых при проектировании микросхемы обеспечивает возможность проведения такой обработки с гарантированным соответствием полупроводниковой структуры, полученной в результате обработки, требованиям к качеству и надежности – так называемые, *правила проектирования*;

- совокупность тестовых элементов (структур), включаемую в состав обрабатываемой кремниевой пластины, используемую для мониторинга выходных характеристик технологических операций, технологических блоков или процесса в целом – так называемый, *параметрический монитор*;

- программно-аппаратное обеспечение и методы, используемые для непрерывной оценки стабильности (неизменности) входных параметров и выходных характеристик технологического процесса – средства *статистического контроля процесса* [1, 2].

Термин «базовый технологический процесс», равным образом, как и сопутствующие его разработке и реализации термины «параметрический монитор», «структура контроля (характеризации) технологии» и «типовая оценочная схема», до последнего времени отсутствовал в отечественной нормативной документации и представляет собой кальку с соответствующего английского термина (baseline), широко используемого в зарубежных технических и нормативных документах и являющегося одним из ключевых понятий, используемых в системе «групповой гарантии качества». Однако, в 2009 году было утверждено временное положение [3], определяющее систему требований к пластинам с кристаллами заказанных элементов, их разработке, производству и поставке. В этом положении впервые в отечественной нормативной документации введено понятие базового технологического процесса и сопутствующих ему требований.

Тем не менее, реализация концепции базовых технологических процессов была начата на технологическом комплексе НИИСИ РАН гораздо раньше, начиная с конца 1990-х годов. Это было, в значительной степени, вынужденной мерой, вызванной тем, что указанные выше причины, потребовавшие максимальной унификации технических решений при проектировании и производстве микросхем, проявились гораздо раньше и острее в производственном процессе НИИСИ РАН, по сравнению с другими предприятиями отечественной микроэлектроники. Технологический комплекс НИИСИ РАН изначально был ориентирован на единичное или мелкосерийное изготовление широкой номенклатуры высокосложных микросхем, эксплуатируемых в жестких условиях [1, 2].

Естественно, разработка базовых технологических маршрутов, имеющая в виду обеспечение «одинаковости» процессов изготовления обработки пластин с кристаллами микросхем различных типов предусматривала:

- одинаковость правил и процедур проектирования этих микросхем;

- преимущественное использование при верификации проектов микросхем процедур моделирования, а не натурных испытаний;

- преимущественное использование при контроле технологического процесса непрямых методов проверки его результатов путем замены прямых измерений физических характеристик их оценкой по результатам электрических измерений тестовых структур;

- максимальное использование принципа конструктивно-технологического подобия при испытаниях готовой продукции («распространение» результатов отдельных квалификационных и периодических испытаний одного – двух типов микросхем на всю продукцию, прошедшую обработки в одном базовом процессе).

Именно при соблюдении всех этих условий и возникает производственное понятие «базового технологического процесса», в котором различная продукция проходит обработку и проверки в одинаковых условиях и режимах, после чего признается неотличимой, по широкой номенклатуре критериев, с точки зрения ее уровня качества, несмотря на разнообразие функциональных характеристик ее отдельных представителей. Этот подход позволил в течение менее чем 15 лет разработать и внедрить на технологическом комплексе НИИСИ РАН восемь базовых технологических процессов:

- процессы изготовления цифровых КМОП микросхем на основе эпитаксиальных структур с минимальным топологическим размером 0,5 мкм, 0,35 мкм и 0,25 мкм;

- процессы изготовления цифровых КМОП микросхем на основе структур «кремний на изоляторе» с минимальным топологическим размером 0,5 мкм, 0,35 мкм и 0,25 мкм;

- процессы изготовления КМОП микросхем смешанного сигнала на основе эпитаксиальных структур с минимальным топологическим размером 0,35 мкм и 0,25 мкм.

Ниже изложена стратегия и процедуры разработки и реализации этих процессов на технологическом комплексе НИИСИ РАН, а также ключевые технические решения и результаты, достигнутые на различных этапах этих работ.

В общем случае, процедура разработки «базового технологического процесса» в НИИСИ РАН, включает следующие этапы, сопровождающиеся в некоторых случаях, разработкой инструментов (тестовых структур, кристаллов и макетов микросхем), необходимых для проведения соответствующих проверок и испытаний:

- предварительная проработка «технологического маршрута» или, в соответствии с терминологией ГОСТ В 15.004 и ГОСТ РВ 15.205, «разработка технического предложения»;

- отработка технологического процесса («разработка эскизного проекта», согласно терминологии нормативных документов СРПП);

- настройка технологического процесса и демонстрация его возможностей («разработка технического проекта»);
- характеризация технологического процесса («разработка рабочей технологической документации (ТД)»);
- стабилизация технологического процесса (проведение предварительных испытаний процесса).

1. Этап предварительной проработки «технологического маршрута»

На этапе предварительной проработки технологических маршрутов определяют номенклатуру основных выходных характеристик процесса с целевыми значениями допустимых пределов их изменения, предварительную схему технологического маршрута и его критичные блоки. По результатам выполнения этапа принимают решение о принципиальной возможности реализации целевых параметров в рамках предлагаемого проекта технологического маршрута и переходе к этапу эскизного проектирования процесса.

В рамках выполнения этих работ проводят изучение и анализ научно-технической информации (материалы конференций, научно-технические статьи, документация на технологические процессы изготовления микросхем, документация на приобретаемые средства технологического оснащения, информация, полученная при проведении дискуссий и обсуждений проблем технологии изготовления высокосложных микросхем со специалистами ведущих зарубежными микроэлектронных фирм и т.д.) по следующим направлениям:

- функциональные и эксплуатационные характеристики микросхем, используемых для установления исходных целевых номенклатуры и значений выходных характеристик разрабатываемого базового процесса;
- правила проектирования, используемых на предприятиях – изготовителях аналогичных изделий;
- номенклатура и диапазоны значений выходных характеристик разрабатываемого процесса;
- технологические маршруты изготовления микросхем;
- конструктивно-технологические решения отдельных элементов микросхем;
- влияние выходных характеристик технологического процесса на характеристики надёжности микросхем;
- конструкция элементарных тестовых структур (на уровне технологических примитивов);
- методики контроля параметров физической структуры и элементов микросхем;
- технологические возможности дополнительно приобретаемого оборудования, предназначаемого для обработки пластин;
- моделирование технологического процесса и т.д.

На основании этой информации определяют основные целевые топологические и электрические выходные характеристики процесса, разрабатывают технологические маршруты с помощью моделирующих программ и предварительных экспериментов; выделяют критичные блоки, производят оценку рисков.

На этапе предварительной проработки технологического маршрута подтверждают (или уточняют) основные конструктивно-технологические особенности разрабатываемого процесса, характерные для всех базовых технологических процессов, реализуемых в технологическом комплексе НИИСИ РАН, в том числе:

- использование КМОП-технологии;
- использование мелко-щелевой изоляции активных элементов;
- отказ от использования пленок нитрида кремния в качестве технологических и функциональных слоев, т.е. использование безнитридного технологического процесса;
- использование двух типов карманов в эпитаксиальном слое;
- использование быстрых термических процессов для разгонки имплантированной примеси и создания подзатворного диэлектрика;
- заполнение вольфрамом контактных окон в многоуровневой Al/0,5%Cu металлизации;
- выравнивание рельефа поверхности с помощью процессов химико-механической планаризации диэлектрика и вольфрама;
- использование гидрозоновых и флурозоновых процессов на всех этапах обработки в жидкой фазе (общей химической отмывки) пластин по всему технологическому маршруту.

Одновременно определяют перечень «узких» мест в разрабатываемом технологическом маршруте, требующих повышенного внимания при проведении дальнейших работ. Проведение этого анализа проводят по двум направлениям:

- определение принципиальной возможности реализовать разрабатываемый технологический процесс на базе имеющихся средств технологического оснащения;
- определение возможности обеспечить выполнение требований, предъявляемых к качеству и надежности продукции, на выпуск которой ориентирован разрабатываемый процесс.

С целью более эффективного проведения разработки нового базового технологического процесса, технологический маршрут разбивают на блоки (или модули) технологических операций, для которых с помощью более короткого цикла изготовления соответствующих объектов исследований (тестовых структур) определяют основные конструктивно-технологические и электрические характеристики отдельных элементов микросхемы, при этом стремятся к тому, чтобы такие блоки обладали наименьшим влиянием друг на друга.

При выявлении в процессе предварительной проработки технологического маршрута необходимости уточнить или дополнить указанные выше общие конструктивно-технологические особенности базовых процессов, определяют средства, позволяющие реализовать такие уточнения (дополнения), в том числе, дооснащение технологического комплекса НИИСИ РАН, использование новых технологических материалов и др.

Тем не менее, при предварительной проработке технологического маршрута до настоящего времени действует неизменное правило, гласящее, что при всех последующих разработках базовых технологических процессов новых поколений должен сохраняться изначально выбранный принцип построения технологического маршрута, в части разбивки его на технологические блоки и циклы операций. При новых разработках базовых процессов речь идет только об их усовершенствовании в части ужесточения требований к выходным характеристикам технологического блока, цикла и (или) отдельной операции, исходя из требований к маршруту в целом, а также о разработке новых, дополнительных циклов и блоков операций, в зависимости от назначения вновь разрабатываемого процесса (классов и технологических поколений микросхем, на изготовление которых он ориентирован).

В качестве примера реализации такого подхода в таблице 1 приведена укрупненная схема базового технологического процесса изготовления КМОП-микросхем смешанного сигнала на основе эпитаксиальных структур с минимальным топологическим размером 0,25 мкм, использующего в качестве основы базовый процесс изготовления цифровых микросхем того же технологического поколения.

предназначенная для определения наличия и степени зависимостей между входными параметрами и выходными характеристиками технологического процесса.), уточняют диапазоны целевых значений этих характеристик путем экспериментального исследования обработанных пластин к кристаллами ТКО и отладки блоков операций и сквозного технологического процесса, разрабатывают технические требования к тестовому кристаллу контроля (характеризации) технологии (ТКХ) – совокупность тестовых элементов (структур), предназначенная для настройки и оценки возможностей (характеризации) технологического процесса, а также контроля стабильности запасов его характеристик при оценке (квалификации) технологического процесса и его периодическом контроле.. По результатам выполнения этапа принимают решение о переходе к этапу настройки технологического процесса и демонстрации его возможностей.

На этом этапе производят опытную проверку возможности реализации базового технологического процесса, удовлетворяющей требованиям к целевым топологическим параметрам и электрическим характеристикам, сформулированным на предыдущем

Таблица 1. Типовая разбивка технологического маршрута базового процесса изготовления микросхем смешанного сигнала по блокам технологических операций

№№	Блоки операций в технологическом маршруте	
	Логические микросхемы	Аналого-цифровые микросхемы
1	Формирование мелко-щелевой изоляции	Формирование мелко-щелевой изоляции
2	Формирование транзисторов	Формирование транзисторов
2-а	-	Формирование высокоомных резисторов
2-б	-	Формирование PIP конденсаторов
3	Формирование силицида титана	Формирование силицида титана
4	Формирование контактов к активным элементам	Формирование контактов к активным элементам
5	Формирование металлизированной разводки 1-го уровня	Формирование металлизированной разводки 1-го уровня
6	Формирование переходных контактов от 1-го доверхнего уровней	Формирование переходных контактов от 1-го до верхнего уровней
7	Формирование металлизированной разводки от 2-го до предпоследнего уровней	Формирование металлизированной разводки от 2-го до предпоследнего уровней
8	Формирование металлизированной разводки верхнего уровня	Формирование металлизированной разводки верхнего уровня
9	Формирование защитного покрытия	Формирование защитного покрытия

2. Этап отработки базового технологического процесса

На этапе отработки базового процесса разрабатывают тестовые структуры, необходимые для уточнения целевых значений выходных характеристик процесса (как правило, в составе, так называемого, тестового кристалла отладки блоков технологических операций (ТКО) – совокупность тестовых структур,

этапе. При этом, критерием получения положительного результата проверки является, как правило, получение в составе обработанных пластин не менее 10% кристаллов, проверяемые характеристики которых соответствуют установленным требованиям. Опыт показывает, что, при достаточном объеме исходных данных и корректном планировании экспериментов, необходимо обработать, две-три партии пластин с тестовыми кристаллами отладки блоков технологических операций (всего 10-15 пластин).

Так, например, для отработки блоков технологических операций базового технологического процесса изготовления микросхем с минимальным топологическим размером 0,25мкм на объемном кремнии с пятью уровнями металлизации был разработан тестовый кристалл «DESIGN-250» (рисунок 1 и таблица 2).

ТКО «DESIGN-250» включал 12 технологических (фотолитографических) слоев.

Компоновка фотошаблона обеспечивала возможность корректной выборочной печати каждого из этих слоев. Топология слоев содержала, в частности, служебные фотолитографические структуры для контроля точности совмещения, шага мультипликации и линейных размеров элементов для каждого из технологических слоев. Кроме того, на тестовом кристалле были предусмотрены участки для контроля толщины функциональных слоев фотометрическими методами.

Таким образом, на этапе отработки базового технологического процесса была обеспечена

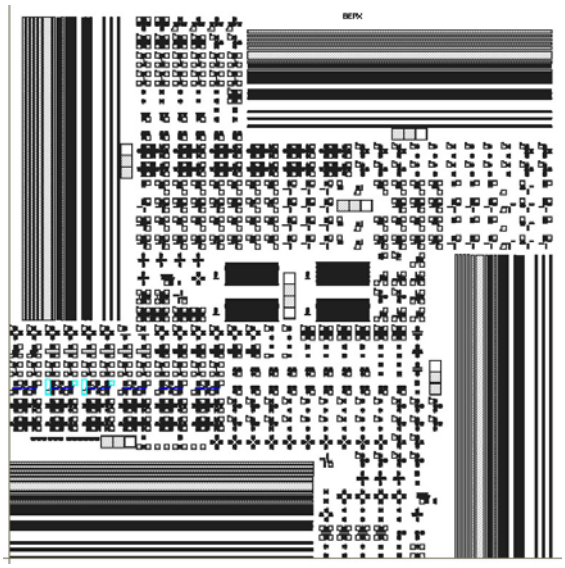


Рисунок 1. Расположение тестовых структур в топологии ТКО «DESIGN-250»

Таблица 2. Номенклатура и назначение тестовых структур кристалла ТКО «DESIGN-250»

№ №	Технологический блок базового процесса	Назначение тестовых структур	Конструктивно-топологические особенности тестовых структур
1	Формирование мелкощелевой изоляции	а) Проведение измерений на сканирующем электронном микроскопе с целью разработки режимов фотолитографии и травления. б) Для проведения электрических измерений удельного поверхностного сопротивления кремниевых шин и токов утечки	а) Структуры выполнены в виде повторяющихся элементов с варьируемыми геометрическими параметрами. б) Структуры в виде единичной шины, вложенной гребенки и меандра с варьируемыми геометрическими параметрами
2	Формирование транзисторов	а) Аналогично п.1а. б) Для проведения измерения на сканирующем электронном микроскопе с целью выбора оптимальных элементов коррекции. в) Аналогично п. 1б. г) Для проведения измерений пробивных напряжений и токов утечек с целью определения надежностных характеристик подзатворного окисла д) Для проведения электрических измерений характеристик структур, направленных на отработку и оптимизацию условий формирования пристеночного окисла. е) Для электрической характеризации транзисторов, генераторов и цепочек инверторов.	а) Аналогично п.1а б) Структуры в виде шин длинной 10 мкм и шириной 0,24 мкм и блоки с имитирующими элементами рабочих схем, имеющие различный набор параметров элементов коррекции. в) Аналогично п. 1б. г) Варьируются конфигурация расположения и геометрический размер элементов активных структур. д) Структуры для измерения: - сопротивления участка активной области между параллельными затворами транзисторов, расположенными с минимальным зазором; - тока транзисторов в открытом состоянии, - тока утечки между поликремневыми шинами. Варьируется зазор между затворами. е) Представлена широкая номенклатура n- и p-канальных МОП-транзисторов, отличающихся длиной и шириной канала для определения их электрических характеристик и технологического запаса. Спроектированы одиночные транзисторы, кольцевые генераторы и цепочки инверторов, в которых варьируется величина вылета затвора за островок и вид использованных фигур оптической коррекции.

Продолжение таблицы 2

№ №	Технологический блок базового процесса	Назначение тестовых структур	Конструктивно-топологические особенности тестовых структур
3	Формирование силицида титана	а) Для проведения электрических измерений пробивных напряжений и токов утечки областях затвор-сток по силициду	а) Структуры различными конфигурациями расположения и геометрическими размерами элементов активных областей и поликремневых шин.
4	Формирование контактов к активным элементам	б) Аналогично п.1а. в) Для проведения электрических измерений статистического контактного сопротивления между слоями ACTIVE, POLY (различного типа легирования) и MET1 с целью оптимизации режима заполнения контактных окон. г) Для проведения электрических измерений тока утечки, связанной с рассовмещением слоев ACTIVE и CONT. д) Для проведения электрических измерений контактного сопротивления между слоями ACTIVE и MET1 с целью выявления рассовмещения слоев ACTIVE и CONT, CONT и MET1 (поправно) на значение статического контактного сопротивления.	б) Аналогично п.1а. в) Структуры представляют собой цепочки из множества контактов к различным транзисторным областям и структуры для измерения сопротивления единичного контакта между соответствующими областями. В обоих структурах варьируемый параметр – размер контактного окна. г) Структуры с предумышленно введенным рассовмещением слоев друг относительно друга. д) Аналогично п. 4в
5	Формирование металлизированной разводки 1-го уровня	а) Аналогично п.1а. б) Для проведения электрических измерений токов утечки и удельного поверхностного сопротивления шин первого металла. в) Аналогично п.2б. г) Для проведения электрических измерений токов утечки с целью выбора оптимальных элементов коррекции.	а) Аналогично п.1а. б) Структуры в виде вложенной гребенки и меандра с варьируемыми геометрическими параметрами. в) Аналогично п.2б. г) Структура в виде гребенки, вложенной гребенки с различными элементами коррекции.
6	Формирование переходных контактов от 1-го до 4-го уровня	а) Аналогично п.1а. б) Для проведения электрических измерений статистического контактного сопротивления между слоями с целью оптимизации режима заполнения переходных контактных окон. в) Для проведения электрических измерений значений контактного сопротивления между металлическими слоями.	а) Аналогично п.1а. б) Структура в виде цепочки контактных окон с единичной металлической шиной длинной 150 мкм. Варьируются размеры диаметра контактного окна и элементов металлических слоев. Также представлена структуры в виде единичного контактного окна с различным диаметром. в) Структуры в виде цепочки контактов диаметром 0,36 мкм с различными геометрическими параметрами металлических шин.
7	Формирование металлизированной разводки от 2-го до 5-го уровней	а) Аналогично п.1а. б) Аналогично п.5б.	а) Аналогично п.1а. б) Аналогично п.5б.

возможность решать многие вопросы, связанные с использованием топологических ограничений, определением надежностных характеристик и показателей качества продукции, планируемой к изготовлению при реализации этого процесса (таблица 2). Основной акцент был сделан на эмпирической проверке условий формирования тех узких мест, которые были обозначены на этапе предварительной проработки технологического маршрута. Ввиду ряда факторов, определяемых особенностями оснащения технологического комплекса НИИСИ РАН, при разработке ТКО «DESIGN-250» было уделено особое внимание проверкам, направленным на выбор условий взаимного расположения слоев и повышения качества формирования затворов и контактных окон.

Применение тестового кристалла «DESIGN-250», позволило подтвердить возможность реализации

технологического процесса изготовления микросхем с минимальным топологическим размером 0,25 мкм на базе имеющегося в составе технологического комплекса НИИСИ РАН технологического оборудования и разработать технологические режимы операций, позволяющие обеспечить выполнение требований к целевым значениям выходных характеристик процесса:

- минимальной ширине затвора транзистора на кристалле (0,25мкм),
- минимальному размеру контактного окна (0,32мкм),
- максимальному количеству уровней металлизации (пять уровней),
- минимальной ширине металлизированной дорожки на различных уровнях металлизации,
- минимальному размеру шага металлизированных дорожек;
- электрическим параметрам p- и n-канальных транзисторов (пороговому и пробивному напряжениям, токам открытого и закрытого состояния).;

Кроме того, использование тестовых структур кристалла «DESIGN-250» позволило выбрать оптимальные условия использования элементов оптической коррекции, позволяющие устранить эффект уменьшения выхода затвора за область кармана.

3. Этап настройки базового технологического процесса

На этапе настройки технологического процесса проводят его предварительную оптимизацию. Под этим подразумевается получение ранее заданных показателей настроенности по характеристикам тестового кристалла квалификации (характеризации) технологии (ТКХ). Если имеется возможность, на этом же этапе проводят изготовление и испытания (проверки) демонстрационной микросхемы – изделия, планируемого к изготовлению в разрабатываемом процессе и призванного продемонстрировать востребованность этого процесса в условиях серийного производства. Результаты его изготовления также используют для оценки точности и настроенности технологического процесса, в дополнение к результатам оценки по результатам изготовления ТКХ. Разработку и изготовление демонстрационной микросхемы не проводят, если в состав ТКХ включены функциональные тестовые структуры (сложно-функциональные блоки), результаты функционального контроля и проверок характеристик которых позволяют принять решение о востребованности разработанного процесса.

В ТКХ, в общем случае, включают:

элементы, предназначенные для измерения целевых значений выходных характеристик процесса (параметров физической структуры обработанной пластины), объединенные, как правило, в единый блок,

специальные элементы, предназначенные для полного описания (характеризации) базового технологического процесса и последующего формулирования ограничений, накладываемых на разработчика микросхем, ориентируемых на изготовление в этом процессе – правил проектирования;

функциональные элементы рабочих микросхем (как правило, простейшие стандартные библиотечные элементы), в том числе, элементы, предназначенные для оценки степени поражаемости микросхем точечными дефектами,

элементы, предназначенные для оценки устойчивости разработанных конструктивно-технологических решений к развитию стандартных механизмов отказов (т.н., элементы «ускоренной оценки надежности» – Wafer Level Reliability, WLR).

Например, кристалл ТКХ «25КХ», разработанный для настройки и характеризации базового технологического процесса изготовления микросхем с минимальным топологическим размером 0,25мкм на объемном кремнии с пятью уровнями металлизации включает 19 фотолитографических слоев и ориентирован на формирование тестовых структур с пятиуровневой металлизированной разводкой (рисунок 2).

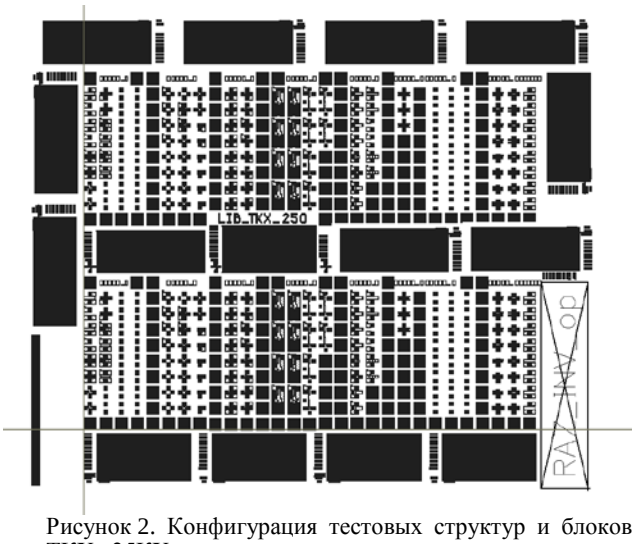


Рисунок 2. Конфигурация тестовых структур и блоков ТКХ «25КХ»

ТКХ «25КХ» включает несколько блоков тестовых структур, объединенных общими целевыми и конструктивно-технологическимирешениями:

- Блок 1 – Тестовые структуры, предназначенные для измерения токов утечки и удельного поверхностного сопротивления;
- Блок 2 – Тестовые структуры, предназначенные для измерений контактных сопротивлений;
- Блок 3 – Набор n- и p-канальных транзисторных структур с различными геометрическими параметрами;
- Блок 4 – Набор тестовых генераторов;
- Блок 5 – Набор линий задержек и функциональных логических блоков (для оценки характеристик быстродействия);
- Блок 6 – Тестовые структуры для проверки надежности подзатворного окисла;

- Блок 7 – Тестовые структуры для измерения утечек в областях затвор-сток по силициду и пробивных напряжений p-n переходов;

- Блок 8 – Тестовые структуры для оценки разброса значений сопротивлений контактных переходов, связанных с рассовмещением и уходом линейных размеров слоев контактов, металлов, переходных контактов.

- Блок 9 – Тестовые структуры Ван-дер-Пау для измерений сопротивлений несилицидированных активных областей и поликремния;

- Блок 10 – Наборы тестовых структур для определения SPICE-параметров транзисторов.

При выполнении работ этапа настройки технологического процесса, помимо разработки тестового кристалла квалификации (характеризации) технологии, проводят:

- разработку (уточнение) концепции операционного контроля и включение в технологический маршрут контрольных операций;

- обработку партий пластин с кристаллами ТКХ и демонстрационной микросхемы и предварительную оценку точности и настроенности технологического процесса по результатам измерений электрофизических параметров тестовых структур, входящих в состав ТКХ, и, в случае несоответствия критериям настроенности процесса по отдельным выходным характеристикам процесса, уточнение входных параметров процесса (режимов проведения отдельных операций) либо принятие решения о допустимости обоснованного изменения требований к этим характеристикам.

Так, например, на этапе настройки базового технологического процесса изготовления микросхем с минимальным топологическим размером 0,25мкм на объемном кремнии было обнаружено, что показатели точности и настроенности процесса по такому важному критерию, как длина канала транзистора (как по пластине, так и по отдельному кристаллу), нельзя считать удовлетворительными, поскольку разница в размерах одиночного и группового элементов фигуры контроля линейных размеров слоя «GATE» составляла, после их формирования, от 0,04 мкм до 0,08 мкм, в зависимости от ряда конструктивных особенностей фотошаблонов.

На основании этого, был сделан вывод, что для производственной реализации соответствующего технологического процесса необходимо дооснащение технологического комплекса НИИСИ РАН оборудованием нового поколения для проведения процессов плазмохимического травления, обеспечивающего разброс того же параметра в пределах 0,02мкм. В результате была произведена закупка процессной камеры травления поликремния POLY DPS PLUS фирмы Applied Materials Inc. (США). При выборе производителя оборудования основное внимание было обращено на значения выходных характеристик процессов травления и на совместимость новой камеры с имеющейся платформой, на которой реализуются процессы сухого размерного травления полупроводниковых и диэлектрических слоев.

Кроме того, были инициированы работы по оптимизации условий подготовки к использованию комплекса правил (rule based optical proximity correction) и моделирующих программ (model based optical proximity correction) для введения элементов коррекции в рисунок рабочего слоя. Ниже приведены примеры применения элементов оптической коррекции, основанной на использовании правил и моделирующей программы (рис.3). На рис.4 приведены карты распределения частоты работы кольцевого генератора, спроектированного в отсутствие и с применением коррекции эффекта оптической близости. В последнем случае наглядно видно улучшение среднего показателя по пластине, что связано с выравниванием характеристик транзисторов в составе кольцевого генератора.

В результате использования пакета моделирующих программ удалось резко повысить воспроизводимость характеристик фоторезистной маски по пластине, от пластине к пластине и от проекта к проекту. А наряду с использованием процессной камеры травления затворного поликремния POLY DPS PLUS стало возможным поддерживать разницу в размерах шин внутри каждого кристалла в пределах 200 А.

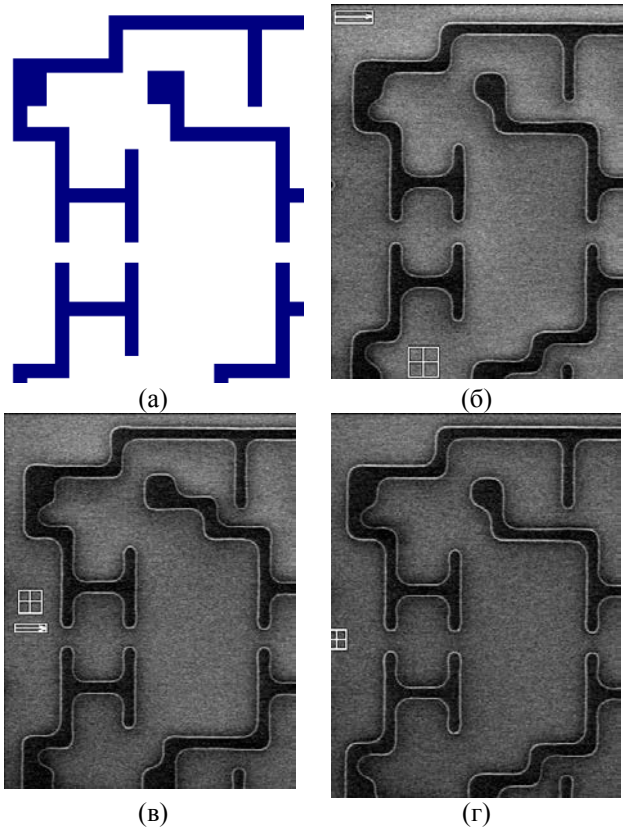


Рисунок 3. Сравнение результатов практической реализации на пластинах топологического рисунка (а) без использования коррекции (б) с использованием комплекса правил (в) и моделирующей программы (г).

Полученные результаты в дальнейшем получили широкое распространение на все проекты с минимальной топологической нормой 0,25мкм, реализуемые на технологическом комплексе НИИСИ РАН.

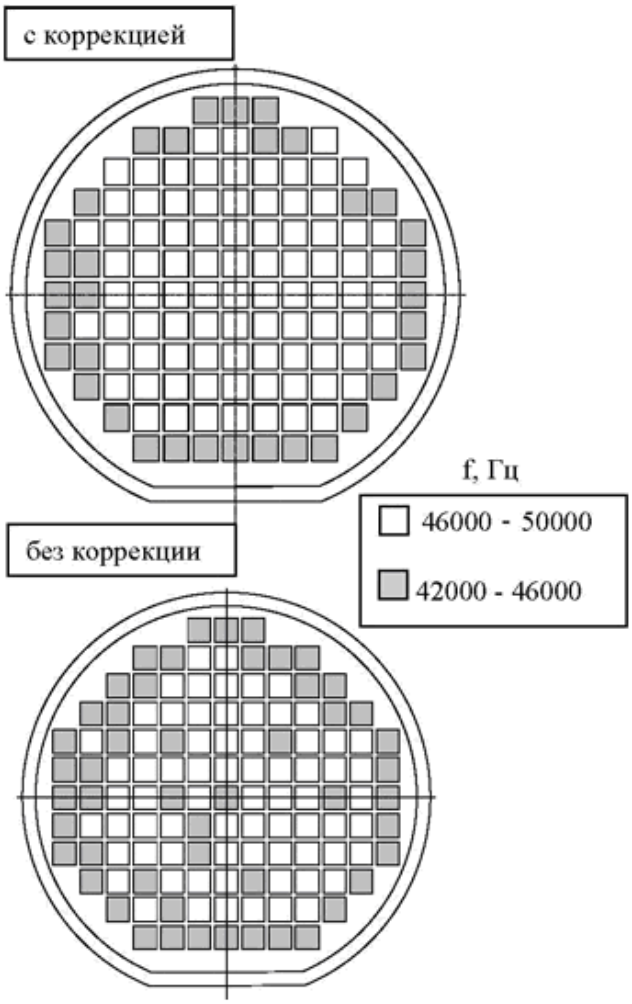


Рисунок 4. Характеристики быстродействия кольцевых генераторов, спроектированных на транзисторах с топологической коррекцией (вверху) и без топологической коррекции (внизу).

В этот же период проводят выбор (или разработку) демонстрационной микросхемы; при этом, одним из условий выбора является отсутствие значимых отклонений характеристик проекта демонстрационной микросхемы от разрабатываемых правил проектирования. Удачным выбором демонстрационной схемы считают такое изделие, особенности проекта которого в минимальной степени маскируют характеристики базового процесса. Принято считать, что такую задачу наиболее эффективно выполняют регулярные структуры, например, статические запоминающие устройства [4].

Демонстрация возможностей разрабатываемого технологического процесса предполагает получение в составе каждой из трех последовательно обработанных в базовом технологическом процессе партий не менее трех пластин со значением выхода годных демонстрационных схем (или заменяющих их функциональных элементов ТКХ) не уступающим 50%. Кроме того, проводят сборку и испытания демонстрационных микросхем для оценки конструктивно-технологических запасов их характеристик к воздействию внешних факторов.

Так при разработке базового технологического процесса изготовления цифровых КМОП микросхем на основе эпитаксиальных структур с минимальным топологическим размером 0,5 мкм в качестве демонстрационной схемы был выбран микропроцессор 1890ВМ1Т с параметрами физической структуры, хорошо изученными по результатам изготовления в режиме «кремниевой мастерской» на зарубежном предприятии (таблица 3).

По результатам исследования характеристик пяти последовательно обработанных в базовом процессе партий пластин (в общей сложности – 20 пластин) была получена статистически значимая оценка изменчивости выходных характеристик технологического процесса, продемонстрирована их хорошая воспроизводимость, уточнены критичные элементы технологического маршрута и соответствующее им расположение точек точек операционного контроля.

Таблица 3. Параметры физической структуры (требования к выходным характеристикам процесса изготовления) демонстрационной микросхемы 1890ВМ1Т

Контролируемый параметр	Среднее значение по пластине	Среднее квадратичное отклонение, %, не более
Удельное поверхностное сопротивление второго уровня металлизации, rosMe2, мОм/ □	от 55 до 70	2
Удельное поверхностное сопротивление третьего уровня металлизации, rosMe3, мОм/ □	от 30 до 35	1.5
Удельное контактное сопротивление между n^+-диффузионным слоем и первым уровнем металлизации, rocNPM1, Ом/контакт	от 5 до 7	0,5
Удельное контактное сопротивление между p^+-диффузионным слоем и первым уровнем металлизации,rocPPM1, Ом/контакт	от 5 до 6,5	0,5
Удельное контактное сопротивление между слоем n^+-легированного поликремния и первым уровнем металлизации, rocNPPM1, Ом/контакт	от 5 до 6,5	0,5
Удельное контактное сопротивление между первым и вторым уровнями металлизации, rocMe1Me2, Ом/контакт	от 1,0 до 1,5	0,1
Удельное контактное сопротивление между вторым и третьим уровнями металлизации, rocMe2Me3, Ом/контакт	от 1,5 до 3,0	0,5

Продолжение таблицы 3

Контролируемый параметр	Среднее значение по пластине	Среднее квадратичное отклонение, %, не более
Удельное контактное сопротивление между вторым и третьим уровнями металлизации, rocMe2Me3, Ом/контакт	от 1,5 до 3,0	0,5
Пороговое напряжение n-канального транзистора, Vth_n, В	от 0,74 до 0,80	0,05
Приведенное значение крутизны n-канального транзистора, Be_n, А/В^2	от 130 до 150	10
Ток насыщения n-канального транзистора, Ion_n, мкА/мкм	от 270 до 290	10
Пробивное напряжение «сток-исток» n-канального транзистора, Vbr_n, В	от 10 до 11	0,1
Ток утечки «сток-исток» n-канального транзистора, Ioff_n, пА/мкм	от 0,3до 2,0	0,3
Пороговое напряжение p-канального транзистора, Vth_p, В	от - 0,66 до -0,72	0,05
Приведенное значение крутизны p-канального транзистора, Be_p, А/В^2	от 40 до 45	3
Ток насыщения p-канального транзистора, Ion_p, мкА/мкм	от -130 до -155	5
Пробивное напряжение «сток-исток» p-канального транзистора, Vbr_p, В	от -8,5 до -9,0	0,05
Ток утечки «сток-исток» p-канального транзистора, Ioff_p, пА/мкм	от -0,3 до -1,5	0,3

В ходе обработки ТКХ и демонстрационных микросхем, по результатам анализа выходных характеристик отдельных операций, технологических блоков и базового процесса в целом были окончательно уточнены входные параметры процесса (параметры, условия и режимы отдельных операций). Выполненные корректировки технологического процесса на последующих партиях привели к увеличению выхода годных демонстрационных микросхем: средний выход годных вырос с 32% до 51% (рисунок 5). Полученные результаты были признаны удовлетворительными и достаточными для того, чтобы в полном объеме характеризовать разработанный технологический процесс и окончательно сформулировать правила проектирования.

Параллельно с процедурами настройки базового технологического процесса проводят разработку предварительной редакции правил проектирования в объеме, достаточном для оценки соответствия демонстрационной микросхемы разрабатываемому процессу, при этом, при контроле тестовых структур ТКХ проводят экстракцию SPICE-параметров, которые тоже включают в правила проектирования.

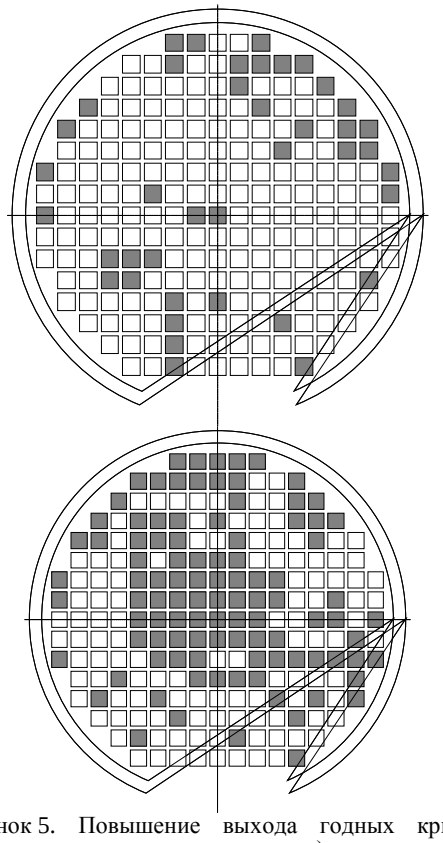


Рисунок 5. Повышение выхода годных кристаллов (светлые кристаллы на диаграмме) демонстрационной схемы 1890ВМ1Т после уточнения параметров и режимов операций на этапе настройки базового технологического процесса (после уточнения параметров операций – вверху, до уточнения – внизу)

4. Этап характеризации технологического процесса

На этапе характеризации базового технологического процесса на основе исследования результатов обработки и проверок ТКХ окончательно формулируют правила проектирования микросхем, ориентируемых на изготовление в этом процессе, и определяют окончательный состав и конфигурацию параметрического монитора. Параметрический монитор – совокупность тестовых структур, формируемая совместно с серийной продукцией в одном производственном цикле обработки пластин и предназначенная для мониторинга выходных характеристик технологических операций и (или) технологических блоков и (или) базового процесса в целом, при операционном контроле продукции и (или) статистическом контроле процесса. С точки зрения контроля качества процесса и продукции,

параметрический монитор является не отдельным изделием, а областью локализации точек съема информации о выходных параметрах процесса.

Так, например, правила проектирования, разработанные для базового технологического процесса изготовления цифровых КМОП микросхем на основе структур «кремний на изоляторе» с минимальным топологическим размером 0,35 мкм, оформленные в виде технологической инструкции и включенные в комплект технологических документов на базовый процесс, содержат:

а) краткое описание базового технологического процесса:

- область применения – микропроцессоры, микроконтроллеры, схемы фиксированной логики и запоминающие устройства с напряжением питания 3,3 В и количеством активных элементов на кристалле до 6 000 000,

- основные конструктивно-технологические особенности – КМОП технология, подложка типа «кремний на изоляторе», минимальный топологический размер 0,35 мкм, один уровень поликремния и четыре уровня металлизации, максимальный размер рабочей области кристалла,- обозначения, назначение и нумерация всех основных и вспомогательных проектных слоев, их схематичное расположение на поперечном разрезе пластины, прошедшей обработку, и их геометрические размеры;

б) требование обязательности выполнения этих правил при проектировании микросхем, ориентированных на изготовление в базовом процессе – как условие гарантирования изготовителем соответствия результатов обработки пластин требованиям к эксплуатационным характеристикам изделия (Правила проектирования не регламентируют системные, архитектурные и схемотехнические проектные решения микросхем, поэтому гарантийные обязательства изготовителя не распространяют на адекватность функциональных характеристик изделий, проходящих обработку в базовом технологическом процессе);

в) требования к форматам передачи инфор-мации о проекте изделия, программно-аппаратной среде проектирования и верификации проекта и передаче информации о результатах верификации;

г) конструктивно-топологические ограничения:

- термины, используемые для описания пространственно-геометрических соотношений, топологических элементов, простейших активных и пассивных функциональных элементов, а также вспомогательных элементов, и их подробные определения;

- требования к выполнению топологических слоёв и конструктивных элементов, в том числе, слоев ядра кристалла, функциональных элементов, а также требования к плотности заполнения в металлизированных слоях;

- правила выполнения элементов схем защиты от воздействия разряда статического электричества;

- правила выполнения периферийных областей, в том числе, контактных площадок, широких шин и периферийных контуров;

д) электрические параметры функциональных элементов и конструктивно-технологических слоев и узлов;

е) SPICE – модели активных элементов.

На этом же этапе для разрабатываемого базового технологического процесса определяют единые состав тестовых структур и конфигурацию параметрического монитора, располагаемого около каждого из кристаллов серийно выпускаемых микросхем в области разделения пластины на кристаллы. Номенклатуру и конструктивно-технологические решения тестовых структур параметрического монитора выбирают, как правило, из состава тестовых структур, ранее включенных в состав ТКХ и продемонстрировавших в процессе характеризации процесса высокую информативность своих характеристик. При этом, все тестовые структуры, предназначенные для контроля электрофизических параметров, имеют единый конструктивный внешний интерфейс (топологию контактных площадок), обеспечивающий высокий уровень автоматизации операционного контроля в условиях серийного производства. Одновременно разрабатывают методики и программы такого контроля.

Так, например, в состав параметрического монитора, используемого для мониторинга базового технологического процесса изготовления цифровых КМОП микросхем на основе структур «кремний на изоляторе» с минимальным топологическим размером 0,25 мкм входят 26 тестовых структур, позволяющих контролировать выходные характеристики процесса:

- пороговое напряжение, приведенное значение тока насыщения, приведенное значение крутизны, напряжение пробоя (смыкания) сток-исток и приведенное значение тока утечки n-канального и p-канального А-транзисторов (две тестовых структуры);

- удельные поверхностные сопротивления силицидированных N^+- и P^+-областей и силицидированного поликремния легированного N^+ и P+ (четыре тестовых структуры);

- удельные поверхностные сопротивления несилицидированных N^+- и P^+-областей и несилицидированного поликремния легированного N^+ и P^+ (четыре тестовых структуры);

- удельные поверхностные сопротивления металлизированных дорожек всех четырех уровней металлизации различной ширины (восемь тестовых структур);

- удельные сопротивления контактного перехода между силицидированными N^+ и P^+-областями, силицидированным поликремнием легированным N^+ и P^+ и первым уровнем металлизации на цепочке контактных переходов (четыре тестовых структуры);

- удельные сопротивления между первым и вторым, вторым и третьим уровнями металлизации на цепочке контактных переходов (одна тестовая структура);

- напряжения пробоя между поликремнием, легированным N^+, и P-карманом (подзатворного окисла n-канального МОП-транзистора) и между поликремнием, легированным P^+, и N-карманом

(подзатворного окисла p-канального МОП-транзистора) (одна тестовая структура);

- токи утечки между активными областями, корманом и подложкой (две тестовых структуры).

Кроме того, на этапе характеризации разрабатываемого базового процесса проводят необходимые уточнения концепции статистического контроля технологического процесса, построение контрольных карт, в том числе, дополняющих их стандартный набор, и первичную оценку стабильности процесса. Если показатели точности, настроенности и стабильности базового технологического процесса признают приемлемыми, процесс считают готовым для использования в серийном производстве изделий, разработанных согласно его правилам проектирования, и для работы в режиме «кремниевой мастерской».

5. Этап стабилизации базового технологического процесса

Строго говоря, процесс стабилизации технологического процесса (повышения коэффициентов точности Cp и настроенности Cpk и сужения контрольных границ) так же бесконечен, как и более общее понятие – процесс непрерывного улучшения качества. Тем не менее, в производстве, организованном на базе технологического комплекса НИИСИ РАН, устанавливают и непрерывно уточняют дополнительные критерии, позволяющие утверждать, что базовый технологический (а более точно – производственный) процесс стабилен [5].

Выработка таких критериев осложняется тем, что традиционный интегральный показатель стабильности производственного процесса – стабильность коэффициента выхода годных изделий на пластине, широко применяемый в условиях массового производства, в случае мелкосерийного и единичного производства [2] на базе технологического комплекса НИИСИ РАН может быть использован для оценки стабильности базового технологического процесса только с большими допущениями и в ограниченных случаях.

Этот показатель годится только в том случае, когда количество обработанных партий пластин с одним изделием достаточно велико. В условиях же технологического комплекса НИИСИ РАН правилом является обработка одного изделия в количестве одной – двух партий. Рассматривать же коэффициенты выхода годных различных изделий на одной контрольной карте не вполне корректно, поскольку этот показатель определяется не только (а зачастую – и не столько!) уровнем качества процесса, сколько *степенью соответствия* проекта изделия правилам проектирования. Иными словами, проект, параметры которого находятся в центре полей допусков, установленных правилами проектирования, более робастен (и, следовательно, «обречен», в общем случае, на более высокий выход годных), чем проект, параметры которого находятся на границах полей допусков (хотя формально и соответствуют требованиям правил проектирования).

Указанные соображения определили преимущественную ориентацию системы контроля стабильности базовых технологических процессов на результаты контроля выходных характеристик процессов с помощью тестовых структур параметрических мониторов.

Выводы

Использование концепции разработки базовых процессов и их реализации для изготовления микроэлектронной продукции является трудозатратной и длительной по времени процедурой. При этом, помимо разработки собственно технологического процесса в узком смысле, требуется создание его достаточно объемной «обвязки» в виде правил проектирования (сопровождаемых, в большинстве случаев, и библиотеками стандартных элементов), средств стандартного мониторинга базового процесса(параметрических мониторов) и процедур статистического контроля процесса.

Однако, реализация в полном объеме указанных работ, позволяет оптимизировать взаимоотношения разработчика и изготовителя микросхем, минимизируя время на постановку на производство нового проекта, ориентированного на реализацию в существующем базовом технологическом процессе, а также существенно снижая затраты на проведение операционного контроля и испытания готовой продукции.

.

Main issues of IC manufacturing baseline development&implementation at SRISA minifab

A.V. Anikin, S.V. Demin, A.A. Stoliarov

Abstract. The generalized flow plan of IC manufacturing baseline development and implementation in conditions of manufacture high sophisticated microcircuits in SRISA minifab is stated. New technological and production concepts are introduced and development steps of technological process and operations are submitted, examples of design rules and the parametrical monitor are given.

Keywords: chip processing facility design, monitoring

Литература

1. Т.М. Антонова, Е.С. Темников Реализация основных принципов контроля стабильности базовых технологических процессов в условиях мелкосерийного производства, «Труды НИИСИ РАН», 2013 г., №1: «Технология и производство субмикронных СБИС».

2. С.И. Волков, Е.П. Волошина Организация производства микроэлектронной продукции на технологическом комплексе НИИСИ РАН, «Труды НИИСИ РАН», 2013 г., №1: «Технология и производство субмикронных СБИС».

3. Временное положение «Изделия электронной техники. Пластины с кристаллами заказанных элементов. Общие технические условия».

4. Руководящие указания по квалификации процесса кремниевой мастерской (Производственные участки обработки пластин) JEDEC/FSA Joint Publication JP001.01 «Foundry Process Qualification Guidelines (Wafer Fabrication Manufacturing Sites)».

5. Т.М. Антонова Применение контрольных карт иерархических процессов в технологических процессах изготовления СБИС с высоким числом уровней изменчивости, «Труды НИИСИ РАН», 2013 г., №1: «Технология и производство субмикронных СБИС».

Конструктивно-технологический базис библиотеки элементов с гарантированным уровнем радиационной стойкости не менее 1 Мрад

С.А. Морозов, С.А. Соколов, А.С. Фирсов, М.Г. Чистяков

Аннотация: В работе проведено исследование и разработка конструктивно-технологического базиса библиотеки элементов для проектирования СБИС в рамках базовой КНИ-технологии с проектными нормами 0,25 мкм и гарантированным уровнем радиационной стойкости не менее 1 Мрад. Созданная на основе разработанного базиса библиотека предназначена для проектирования радиационно-стойких СБИС для использования в космосе.

Ключевые слова: базисбиблиотеки элементов, радиационная устойчивость, СБИС

Введение

Библиотека элементов (БЭ) для проектирования СБИС, предназначенная для разработки сложной современной отечественной электронной компонентной базы, при использовании в электронных системах нового поколения, к которым предъявляются требования гарантированного уровня радиационной стойкости, в том числе стойкости к воздействию тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) в условиях космоса. Библиотека элементов состоит из элементов для проектирования центральной части кристалла и элементов для проектирования периферийной части кристалла. Каждая часть библиотеки отвечает своим специфическим требованиям. Общим требованием является обеспечение требуемого уровня радиационной стойкости. В качестве основы была выбрана базовая технология кремний-на-изоляторе (КНИ) с проектными нормами 0,25 мкм [1]. КНИ-технология имеет ряд неоспоримых преимуществ перед технологией монолитного кремния в части отсутствия тиристорного эффекта [2] и стойкости к ТЗЧ из-за меньшей толщины слоя полупроводника в области кармана (Body) КНИ МОП-транзистора, имеющего типичную толщину 0,2 мкм, а также наличия скрытого слоя изолирующего окисла (Buried Oxide), обеспечивающего полную гальваническую изоляцию элементов [3].

1. Конструктивно-технологический базис библиотеки элементов для проектирования центральной части кристалла

Выбор конструктивно-технологического базиса библиотеки элементов для проектирования центральной части кристалла был сделан на основе сравнительного анализа различных топологических конструкционных решений различных типов КНИ МОП-транзисторов А-, О- и Н- типа, приведенных на рисунке 1

Были отобраны критерии сравнения и проведена оценка преимуществ и недостатков каждого типа транзистора. Это представлено в таблице 1.

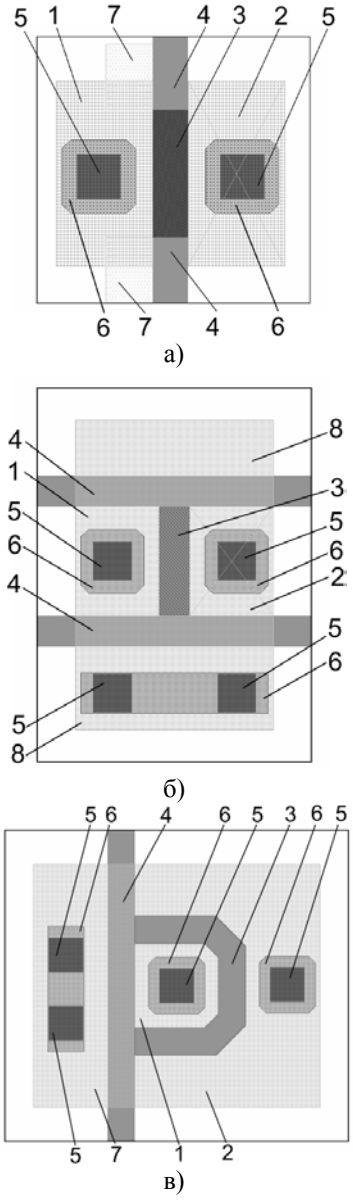


Рисунок 1. КНИ МОП-транзисторы: А-типа (а), Н-типа (б) и О-типа, где:
1 – область истока; 2 – область стока; 3 – активная часть затвора; 4 – пассивная часть затвора; 5 – контакты; 6 – слой металлизации; 7 – «вставки»; 8 – область кармана.

По критерию занимаемой площади, транзисторы можно расположить в следующей последовательности: сначала транзистор А-типа, потом Н-типа, затем О-типа. Это связано с различной формой затворов и пассивной части затвора. Пассивная часть затвора – это та часть, которая не используется в формировании канала транзистора и служит для разделения полупроводниковых областей p- и n-типов [3].

Таблица 1. Преимущества и недостатки КНИ МОП-транзисторов А-, О- и Н-типов.

Критерий	транзистор А-типа	транзистор О-типа	транзистор Н-типа
Компактность	+	–	±
Контакт к карману	±	+	+
Возможность разводки по силициду	+	–	+
Отсутствие пассивной части затвора	+	–	±
Уход порогового напряжения при накопленной дозе облучения 1 МРад	+	±	+
Токи утечки при накопленной дозе облучения 1 МРад	–	+	±

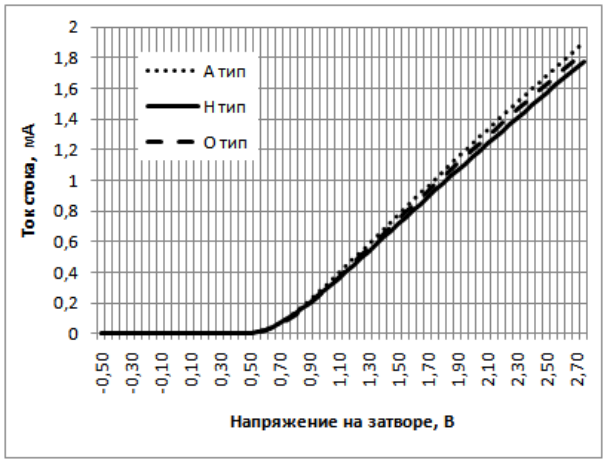
У транзистора А-типа полностью пассивная часть практически отсутствует, а контакт к подложке осуществляется за счет «вставок», поэтому при одинаковой ширине канала транзистор А-типа занимаемает, наименьшую площадь. «Вставки» – это области, расположенные на границе областей затвора и истока, легированные таким же типом примеси, что и область кармана, и соединенные слоем силицида с областью истока. Далее следует транзистор Н-типа. Транзистор О-типа, с точки зрения занимаемой площади, находится на последнем месте, т.к. внутри кольца необходимо установить контакт к карману, что неизбежно приводит к увеличению размеров и, следовательно, к увеличению занимаемой им площади кристалла. У всех типов рассмотренных транзисторов присутствует контакт к карману, но в транзисторе А-типа он жестко связан с истоком, что делает невозможным использование этих транзисторов в проходных ключах. У транзисторов Н- и О- типов такой контакт электрически не связан с областью истока.

С точки зрения топологической реализации библиотечного элемента важным является возможность разводки с помощью силицидированных областей кремния и поликремния. Это позволяет сократить количество слоев металла и использовать только один слой металлизации при построении библиотечного элемента, оставляя для выполнения межэлементных соединений максимальное число уровней металлизации.

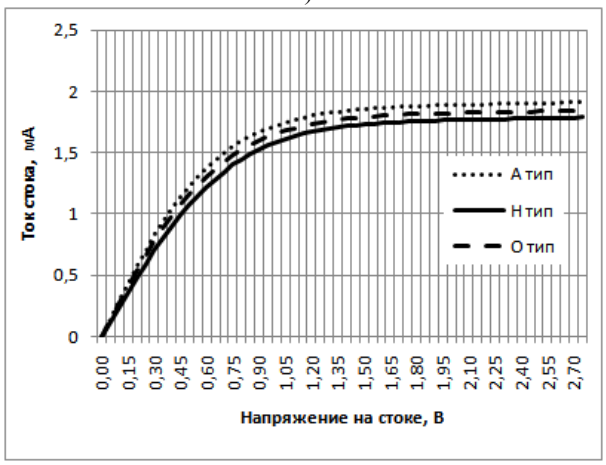
Теперь рассмотрим транзисторы указанных типов с точки зрения их электрических параметров. Одним из важных параметров является входная емкость. Основной вклад во входную емкость транзистора дает емкость подзатворного диэлектрика [4], которая прямо пропорциональна длине и ширине канала, при этом учитывается и активная, и пассивная его части. Поэтому при одинаковой ширине канала у транзистора А-типа наблюдается самая малая входная емкость, у транзистора О-типа наблюдается самая большая входная емкость. У транзистора Н-типа входная емкость имеет промежуточное значение.

Другими важными параметрами являются уход при наборе дозы порогового напряжения и токов насыщения КНИ МОП-транзисторов. Эти параметры влияют на быстродействие и динамическое потребление библиотеки элементов.

Пороговые и выходные характеристики КНИ МОП-транзисторов А-, Н-, О-типов с длиной канала L = 0,25 мкм и шириной затвора W = 3 мкм изображены на рисунке 2.



а)



б)

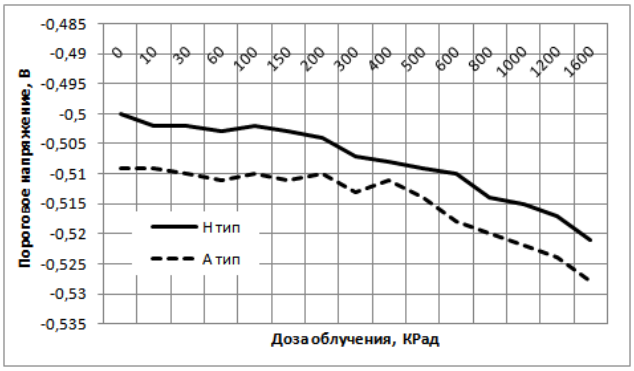
Рисунок 2. Пороговые характеристики КНИ МОП-транзисторов А-, Н-, О-типов (а) и их выходные характеристики при напряжение на затворе 2,75 В.

Пороговые характеристики у всех транзисторов, представленных на рисунке 2 (а), без набора дозы близки по значениям (различия между значениями менее 5%), что видно из графиков. Это позволяет исполь-

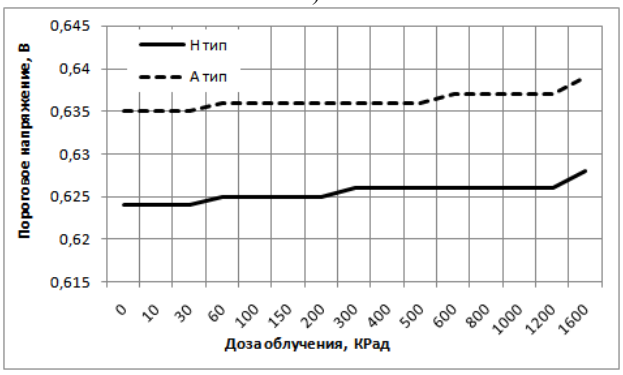
зовать такие транзисторы при проектировании СБИС без использования специальных схем сопряжения.

Как видно из выходных характеристик, представленных на рисунке 2 (б), различия между значениями величины токов также менее 5%. При высоких значениях напряжения на затворе транзистор А-типа обладает большим током стока, по сравнению с транзисторами О- и Н-типов. Это связано с тем, что у транзистора Н-типа при протекании тока захватывается часть пассивной области затвора, а у транзисторов О-типа происходит увеличение длины канала в местах изгиба затвора.

Как отмечалось в работе [5], при наборе дозы 1 Мрад сдвиг пороговых напряжений КНИ МОП-транзисторов А-типа и О-типа не превышает 60 мВ (около 10% от исходного значения) и практически не зависит от потенциала подложки при облучении и конструкции транзистора. Результаты исследований поро-



а)



б)

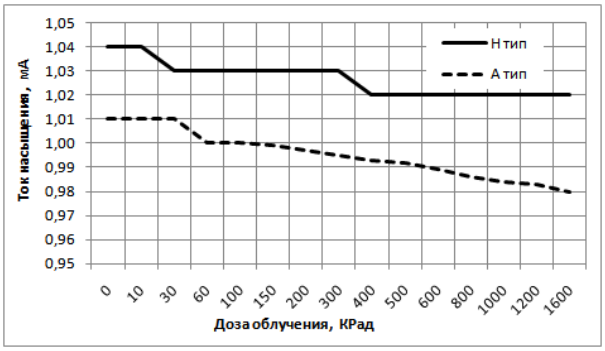
Рисунок 3. Изменение порогового напряжения *p*-канальных транзисторов (а) и *n*-канальных транзисторов (б) от дозы облучения.

говых характеристик транзисторов А-типа и Н-типа от дозы облучения приведены на рисунке 3.

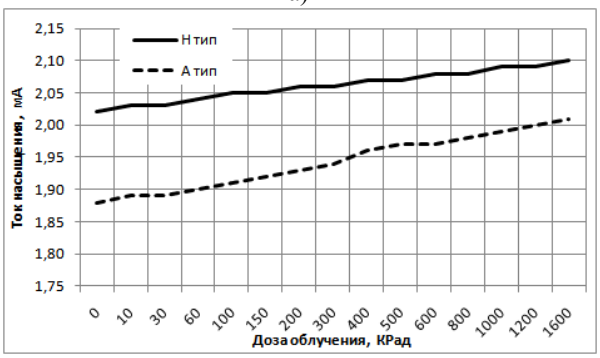
Как видно из графика, представленного на рисунке 3 (б), уход порогового напряжения у n-канального транзистора А-типа больше, чем у n-канального транзистора Н-типа. Тем не менее, это показывает, что качество формируемого в технологическом процессе подзатворного диэлектрика достаточно высоко и сдвиг пороговых напряжений *n*- и *p*-канальных транзисторов не препятствует изготовлению КНИ СБИС с уровнем стойкости к накопленной дозе не менее 1 Мрад.

Еще одним фактором при наборе дозы является рост тока утечки транзисторов. Токи утечки при воздействии радиации наблюдаются в зонах выхода активной части затвора на слой защитного оксида. В работе [4] было проведено сравнение токов утечки транзисторов А-типа и О-типа при наборе дозы. Было отмечено, что транзистор А-типа обладает высокими токами утечки, а у транзистора О-типа токи утечки самые малые.

Необходимо также отметить различие в характере изменения кривых токов насыщения для транзисторов



а)



б)

Рисунок 4. Изменение тока насыщения p-канальных транзисторов (а) и n-канальных транзисторов (б) от дозы облучения.

А-типа и Н-типа. На рисунке 4 приведены графики изменения этих токов насыщения при наборе дозы.

Как видно из графиков у КНИ МОП-транзисторов Н-типа ток насыщения изменяется в меньшей степени, чем у транзисторов А-типа. У *p*-канальных транзисторов это проявляется значительнее.

На основании приведенных данных использование КНИ МОП-транзистора А-типа неприемлемо для библиотеки элементов с гарантированным уровнем стойкости не менее 1 Мрад из-за высоких токов утечки при наборе дозы.

Для создания библиотеки элементов центральной части кристалла были разработаны новые конструктивные решения КНИ МОП-транзисторов Н-типа и О-типа (рисунок 5), способные выдержать радиационное воздействие более 1 Мрад. Также проведен дополнительный сравнительный анализ с целью выбора наилучшего решения.

Модифицированный транзистор О-типа не имеет вылета затвора на изолирующий слой, что радикально снижает токи утечки при наборе дозы. Также он обладает высокой входной емкостью, из-за которой происходит сглаживание импульсных помех при попадании тяжелых заряженных частиц.

Модифицированный транзистор Н-типа обладает меньшей входной емкостью и меньшей площадью по

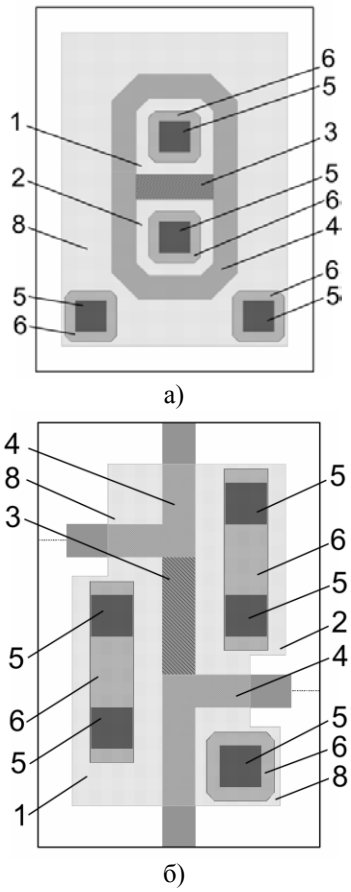


Рисунок 5. Модифицированные КНИ МОП-транзисторы: О-типа (а) и Н-типа (б), где:
1 – область истока; 2 – область стока; 3 – активная часть затвора; 4 – пассивная часть затвора; 5 – контакты; 6 – слой металлизации; 7 – «вставки»; 8 – область кармана.

сравнению с модифицированным транзистором О-типа и стандартным транзистором Н-типа.

Основной вклад в потребляемую МОП-транзистором мощность дает мощность, расходуемая на перезаряд емкости подзатворного диэлектрика, при этом емкость подзатворного диэлектрика напрямую зависит от площади, занимаемой затвором транзистора.

Исходя из вышесказанного, в таблице 2 приведены размеры затворов для транзисторов Н- и О-типов, длина L и ширина W активной части транзистора, длина $L_{пасс}$ и ширина $W_{пасс}$ пассивной части транзистора. Для расчетов размеров затворов были использованы транзисторы, разработанные по минимальным проектным нормам для достижения максимальной плотности построения библиотеки элементов. Общая площадь, занимаемая затвором равна сумме площадей, занимаемых активной и пассивной частями затвора (1):

$$S_{\Sigma} = S_{акт} + S_{пасс} = W \cdot L + W_{пасс} \cdot L_{пасс}, \qquad (1)$$

Входная емкость $C_{вх}$ определяется емкостью подзатворного оксида. Она равна (2):

$$C_{вх} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S_{\Sigma}}{D}, \qquad (2)$$

где: ε – относительная диэктрическая проницаемость подзатворного диэлектрика $\varepsilon = 4$,

ε_0 – диэлектрическая постоянная, $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \frac{Ф}{м}$,

S_{Σ} – общая площадь затвора с учетом пассивной области,

D – толщина подзатворного диэлектрика, для КНИ технологии с проектными нормами 0,25 мкм $D = 42 \cdot 10^{-10}\, м$

Известно [5], что динамическая потребляемая мощность $P_{дин}$ для КМОП СБИС определяется по формуле (3):

$$P_{дин} = fU^2 C_{вх}, \qquad (3)$$

где f – рабочая частота транзистора,

U – рабочее напряжение транзистора, для КНИ технологии с проектными нормами 0,25 мкм, $U = 2{,}5B$,

$C_{вх}$ – входная емкость транзистора.

Для сравнительного анализа, рассмотрим СБИС типа «система нам кристалле», имеющую степень интеграции 20 млн. транзисторов. Расчет потребляемой мощности предполагается при условии, что в схеме одновременно переключается половина транзисторов, то есть 10 млн. В этом случае суммарная потребляемая мощность СБИС P_{Σ} определяется формулой (4):

$$P_{\Sigma} = nP_{дин} = nfU^2 C_{вх}, \qquad (4)$$

где: $P_{дин}$ – динамическая потребляемая мощность,

n – число переключающихся транзисторов, $n = 10^7$.

Для оценки потребляемой мощности примем рабочую частоту СБИС равной $f = 150 МГц$.

В таблице 3 приведены расчетные значения электрических параметров транзисторов. В таблице показаны значения входной емкости $C_{вх}$, общей площади затвора S_{Σ} и суммарной потребляемой мощности P_{Σ}. Как видно из представленных значений, самой меньшей потребляемой мощностью обладают СБИС с использованием модифицированных транзисторов Н-типа и СБИС с использованием обычных транзисторов Н-типа.

Таблица 2. Размеры затворов КНИ МОП-транзисторов.

Тип транзистора	W, *мкм*	L, *мкм*	$S_{акт}$, *мкм*^{2}	$W_{пасс}$, *мкм*	$L_{пасс}$, *мкм*	$S_{пасс}$, *мкм*^{2}	S_{Σ}, *мкм*^{2}
Н-тип	0,74	0,24	0,1776	$2 \cdot 1{,}56$	0,24	0,7488	0,9264
О-тип	0,74	0,24	0,1776	3,75	0,24	0,9	1,0776
Модифицированный Н-тип	0,74	0,24	0,1776	$1{,}08 + 1{,}36$	0,24	0,5856	0,7632
Модифицированный О-тип	0,74	0,24	0,1776	5,45	0,24	1,308	1,4856

Таблица 3. Расчетные значения электрических параметров при заданной рабочей частоте.

Тип транзистора	$S_{\Sigma}, мкм^2$	$C_{вх}, фФ$	$P_{\Sigma}, Вт$
Н-тип	0,9264	7,8082	73,20
О-тип	1,0776	9,0826	85,15
Модифицированный Н-тип	0,7632	6,4326	60,3
Модифицированный О-тип	1,4856	12,5215	117,39

Таким образом, для обеспечения гарантированной радиационной стойкости 1 Мрад лучшим является модифицированный КНИ МОП-транзистор О-типа, однако это конструктивное решение обладает высокой входной емкостью 12,5214 фФ, что при одновременном переключении 10 млн. транзисторов в СБИС приводит к высокой потребляемой мощности 117,39 Вт. Также это конструктивное решение имеет большую площадь и, следовательно, меньшую плотностью компоновки. Поэтому целесообразно использовать транзистор О-типа при W больше, чем 2,48 мкм, а ниже этого значения необходимо использовать транзистор Н-типа, особенно для библиотеки элементов центральной части кристалла, где необходима высокая плотность компоновки. Для библиотеки элементов периферийной части кристалла наоборот применение транзистора О-типа предпочтительнее, что будет рассмотрено далее. Исходя из этого, для создания библиотеки элементов центральной части кристалла был выбран модифицированный транзистор Н-типа, который обладает высокой плотностью компоновки и имеет независимый контакт к подложке. СБИС с использованием транзисторов данного типа обладают самой меньшей потребляемой мощностью. С целью достижения наибольшей плотности размещения БЭ разрабатывались с учетом следующих требований:

- фиксированная высота элементов;
- длина элемента должна быть кратна шагу сетки трассировки по координате X;
- сверху элемента должна располагаться шина «Питание»;
- снизу элемента должна располагаться шина «Земля»;
- входы/выходы библиотечных элементов должны лежать в сетке трассировки.

Это позволяет выстраивать библиотеку элементов рядами, тем самым, достигая максимальной плотности компоновки, а при межсоединениях избегать изгибов и обеспечить минимальный зазор между проводниками во время трассировки. Расположение шин «Питание» и «Земля» сверху и снизу БЭ позволяет создавать «питающие рельсы» через все элементы, тем самым обеспечивая подключение любого элемента к этим шинам.

Шаг сетки трассировки обеспечивает минимальный зазор между проводниками в соответствии с правилами проектирования. Для его выбора необходимо учитывать ограничения на минимальный зазор и ширину между проводниками для технологического процесса. Для технологического процесса КНИ 0,25 мкм ограничения представлены в таблице 4.

Для систем проектирования, используемых для автоматизированной разводки СБИС, необходимо, чтобы направление шин в соседних уровнях металлизации было ортогонально. Так как первый слой металлизации содержит шины «Питание» и «Земля», которые располагаются горизонтально, то направление межсоединений в слое первого металла должно быть горизонтально. Следовательно, направление межсоединений во втором и четвертом слое металлизации – вертикально, а в третьем и пятом – горизонтально. Из-за того, что в слоях металлизации, используемых для вертикальной и горизонтальной разводки, минимальная ширина проводника и минимальный зазор между проводниками различаются (как это видно из таблицы 4), то целесообразно использовать различный шаг сетки трассировки по горизонтали и вертикали.

Таблица 4. Значения ширины и зазоров проводников в различных слоях металлизации.

Слой межсоединения	**Ширина проводника, мкм**	**Зазор между проводниками, мкм**
1-й слой металлизации	0,32	0,32
2-ой слой металлизации	0,36	0,40
3-ий слой металла	0,36	0,40
4-ый слой металла	0,36	0,40
5-ый слой металла	0,44	0,46

Ширина проводника и зазор межу проводниками, располагающиеся вертикально, определяют шаг сетки по горизонтали. Для КНИ технологии с проектными нормами 0,25 мкм при ширине проводника во втором слое металлизации 0,36 мкм и зазоре между проводниками 0,40 мкм шаг сетки трассировки по вертикали должен быть 0,76 мкм, при округление до десятых для удобства расчетов, получаем шаг сетки трассировки по горизонтали 0,8 мкм.

Аналогично производится расчет вертикального шага сетки трассировки. Самой большой шириной проводника, расположенного вертикально, является ширина пятого слоя металлизации, равная 0,44мкм. Зазор между проводниками пятого металла равен 0,46мкм. В результате шаг сетки по вертикали равен 0,9мкм.

Так как размеры библиотеки элементов должны быть кратны шагам сетки трассировки, поэтому ширина ячеек должна составлять 0,8 мкм×N, где N-целое число. Как уже отмечалось, высота ячеек элементов

библиотеки должна быть одинаковой. Для её определения была разработана топология D-триггера с двумя мультиплексируемыми каналами данных (рисунок 6) и произведена оценка высоты полученной ячейки и привидение её к шагу сетки.

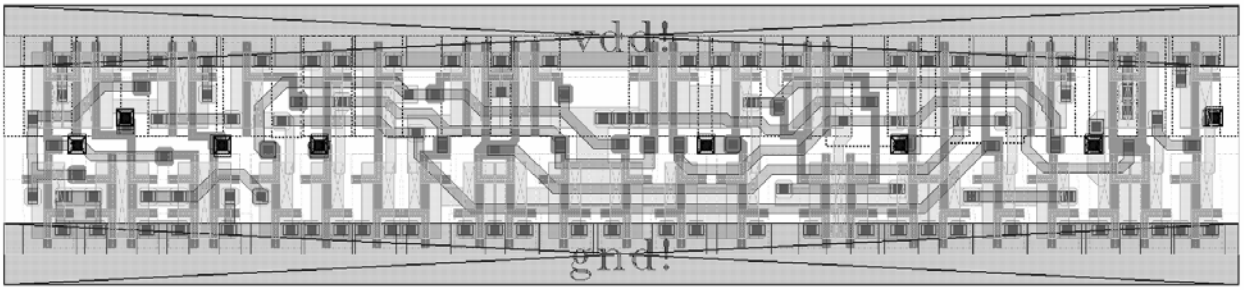


Рисунок 6. Топология D-триггер с двумя мультиплексируемыми каналами данных

На основании вышесказанного высота ячеек библиотеки элементов центральной части кристалла должна быть 0,9 мкм×N, где N-целое число. И на основание разработки топология D-триггера была выбрана равной 7,2 мкм. С учетом этого разработано свыше 200 библиотечных элементов, обеспечивающих гарантированный уровень стойкости к накопленной дозе не менее 1 Мрад при разработке СБИС на основе этой библиотеки элементов. Плотности компоновки транзисторов при проектирование СБИС, оценена на примере такого сложнофункционального блока, как 16-ти разрядный микроконтроллер. Плотность компоновки составила $1{,}6\times10^5$ транзисторов/мм^2.

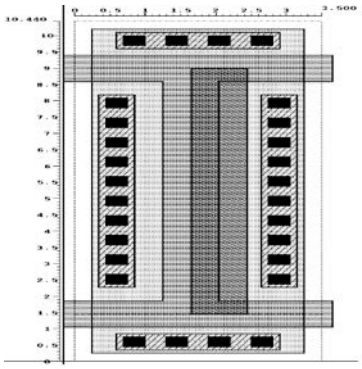
2. Конструктивно-технологический базис библиотеки элементов для проектирования периферийной части

Для библиотеки элементов периферийной части кристалла (элементы ввода-вывода) одним из основных требований является обеспечение защиты СБИС от воздействия электростатического разряда (ЭСР) с уровнем не менее 2 кВ и обеспечение нагрузочной токовой способности выходных драйверов не менее 8 мА для базовой КНИ технологии с проектными нормами 0,25 мкм при номинальном напряжении питания 3,3 В.

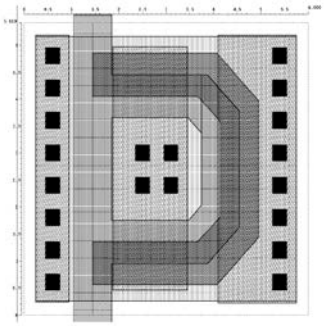
В качестве базовых конструктивных элементов для проектирования элементов ввода-вывода были выбраны транзисторы Н-типа и О-типа с дополнительными контактами к областям стоков и истоков, обеспечивающие малое сопротивление этих областей и, соответственно, большие токи (рисунок 7).

Эти транзисторы обладают гарантированной стойкостью к накопленной дозе не менее 1 Мрад, как было рассмотрено выше. Анализируя геометрические параметры топологии рассматриваемых транзисторов, было выявлено несколько фактов, которые играют важную роль при выборе базового элемента для проектирования элементов защиты и обеспечения высокой нагрузочной способности. Во-первых, транзистор О-типа занимает на 12% меньше площади, чем аналогичный транзистор Н-типа. Во-вторых, транзистор О-типа имеет меньшую площадь области стока и, как следствие, меньшую выходную емкость. В-третьих, активная область затвора транзистора О-типа не имеет прямых углов, что обеспечивает более равномерное растекание тока при ЭСР.

На рисунке 8 представлены выходные характери-



а)



б)

Рисунок 7. Конструктивно-топологическая реализация базовых КНИ МОП-транзисторов Н-типа (а) и О-типа (б)

стики представленных транзисторов (транзистор Н-типа на верхнем графике, транзистор О-типа на нижнем). Из графиков видно, что ток стока транзистора

Н-типа при напряжении сток-исток, равном 2,5 В, на 5% больше, чем ток стока транзистора О-типа при аналогичных напряжениях, что позволяет быстрее отводить ток при воздействии электростатического разряда.

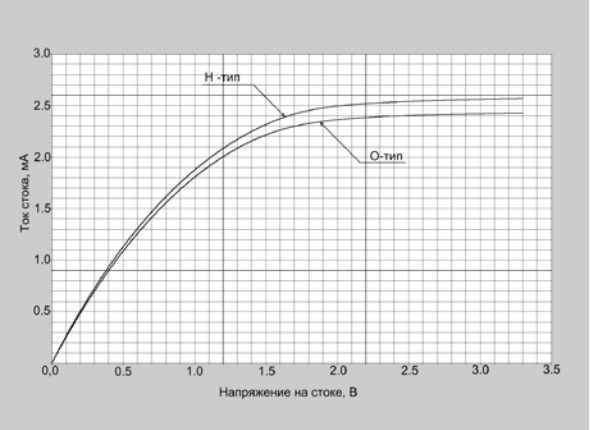


Рисунок 8. Выходные характеристики КНИ МОП-транзисторов Н-типа и О-типа при напряжении затвор-исток 3,3 В.

Анализируя полученные данные, в качестве базового элемента была выбрана конструктивно-топологическая реализация транзистора О-типа. Несмотря на то, что данный тип транзистора имеет недостаток по токовой характеристике, он имеет также ряд существенных преимуществ. Жертвуя незначительными потерями в характеристиках отводимого тока электростатического разряда, выигрываем в таких важных параметрах как площадь и быстродействие, а также избегаем эффекта выгорания подзатворного окисла в углах затвора транзистора. Также необходимо отметить, что в базовой КНИ технологии с проектными нормами 0,25 мкм используется силицид тугоплавкого металла, снижающий сопротивления областей стока и истока транзисторов, и тем самым, увеличивающий быстродействие схемы. Однако при разработке элементов защиты от электростатического разряда в элементах ввода-вывода это приводит к тому, что тонкий слой на поверхности областей стока и истока обладает меньшим сопротивлением, чем внутренний объем и, следовательно, ток от ЭСР концентрируется у поверхности транзистора. Из-за этого увеличивается плотность тока, что может вызвать выгорание транзистора. Чтобы избежать этого эффекта, в истоках транзисторов О-типа используется несилицидированная область, что позволяет распределить ток от ЭСР по всей глубине залегания p-n перехода.

Для защиты от электростатического разряда был выбран метод выборочного пути, обеспечивающий направление тока при стрессе по определенному пути. Этот метод подробно описан в работе [7].

На основе выбранной конструктивно-топологической реализации транзистора О-типа были разработаны библиотечные элементы с номинальной нагрузочной способностью от 2 мА до 8 мА, подразделяющие на следующие группы:

- входной элемент с триггером Шмитта на входе;
- выходные элементы;
- выходные элементы, имеющие дополнительный вход управления третьим состоянием на выходе;
- двунаправленные элементы ввода-вывода сигналов с триггером Шмитта на входе;
- элементы ввода земли/питания для питания элементов ввода-вывода;
- элементы ввода земли/питания для питания внутренней части кристалла;
- специальные угловые ячейки и элементы заполнения для формирования системы шин питания.

Группы входных, выходных и двунаправленных ячеек включают в себя элементы с привязкой выходных сигналов к напряжению питания и к общему уровню.

На рисунке 9 представлена обобщенная структурная схема элемента ввода-вывода.

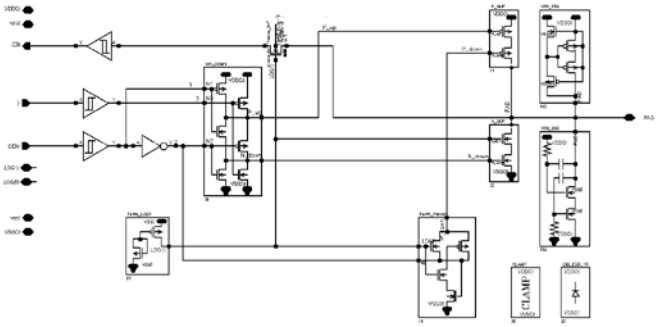


Рисунок 9. Обобщенная структурная схема ячейки ввода-вывода.

На рисунке 10 представлена топология элемента ввода-вывода.

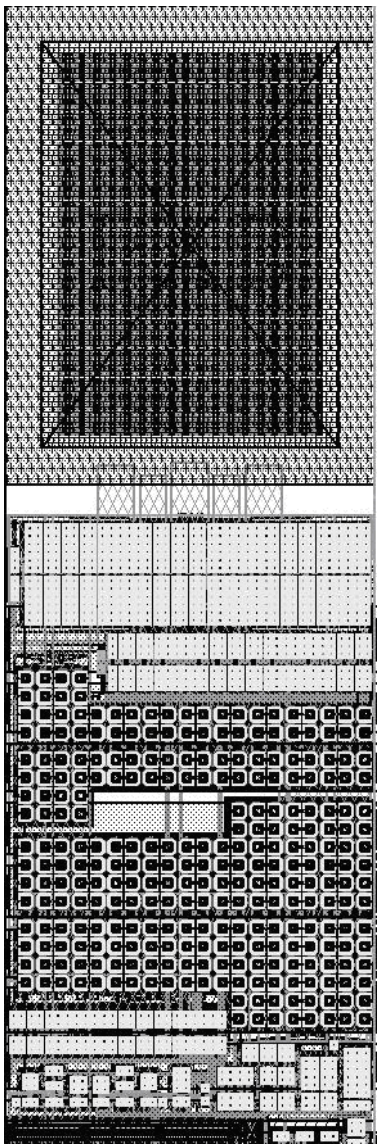


Рисунок 10. Топология ячейки ввода-вывода.

Элементы ввода-вывода допускают возможность использования двух напряжений питания: 2,5 В для согласования логических уровней с библиотекой элементов центральной части кристалла и 3,3 В для связи с внешними устройствами.

С учетом этого разработано свыше 50 элементов ввода-вывода, обеспечивающих гарантированный уровень стойкости к накопленной дозе не менее 1 Мрад и обеспечивающий уровень защиты от электростатического разряда не менее 2 кВ.

Выводы

На основе сравнительного анализа радиационно-стойких топологических конструкционных решений транзисторов для технологии КНИ 0,25 мкм был разработан конструктивно-технологический базис транзисторов, обеспечивающих гарантированный уровень радиационной стойкости не менее 1 Мрад, для библиотеки элементов центральной и периферийной частей системы-на-кристалле. Представлены топологические конструкции транзистора Н-типа для библиотеки центральной части, и транзистора О-типа для элементов ввода-вывода, обеспечивающие гарантированный уровень радиационной стойкости и высокую стойкость к воздействию тяжелых заряженных частиц, высокую плотность компоновки библиотечных элементов центральной части. и высокую стойкость защиты элементов ввода-вывода от электростатического разряда. На основе этого базиса было разработано свыше 200 библиотечных элементов центральной части кристалла и свыше 50 элементов ввода-вывода.

The design and technological basis of standard cells library for VLSI with a guaranteed level of total dose hardness more than 1 Mrad

S.A. Morozov, S.A. Sokolov, A.S. Firsov, M.G. Chistiakov

Abstract. The design and technological basis of 0.25 um SOI standard cells library for development VLSI with a guaranteed level of total dose hardness more than 1 Mrad has been considered in this paper. The library is intended for design of radiation resistant VLSI for use in space.

Keywords: basis library elements, radiation resistance, VLSI

Литература

1. А.В. Аникин, С.В. Демин, А.А. Столяров Проблемы разработки и реализации базовых технологических процессов на технологическом комплексе НИИСИ РАН // «Труды НИИСИ РАН», 2013 г., №2: «Опто-электронные системы» (в этом выпуске).
2. Kerry Bernstein, J. Norman Rohrer SOI Circuit design concepts // London: Kluwer academic publishers, 2003. – 220 с.
3. С.А. Морозов, С.А. Соколов. Радиационные эффекты при воздействии тяжелых заряженных частиц КНИ СБИС и способы их моделирования // Труды НИИСИ РАН. Математическое и компьютерное моделирование систем: прикладные аспекты. Том 1, вып. 2. – Москва, Издательство «НИИСИ РАН», 2011. – с. 47-51.
4. James B. Kuo, Ker-Wei Su CMOS VLSI Engineering Silicon-on-Insulator (SOI) // London: Kluwer academic publishers, 1998. – 422 с.
5. С.И. Волков, А.А. Глушко, С.А. Морозов Исследование и моделирование факторов, ограничивающих радиационную стойкость КНИ СБИС // Труды НИИСИ РАН. Математическое и компьютерное моделирование систем: прикладные аспекты. Том 1, вып. 1. – Москва, Издательство «НИИСИ РАН», 2011. – с. 51-56.
6. С. Мурога Системное проектирование сверхбольших интегральных схем. Том 1 // М.:Мир, 1985. – 288 с.
7. С.А. Морозов Исследование и моделирование метода выборочного пути для защиты КНИ КМОП СБИС от электростатического разряда // Труды НИИСИ РАН. Математическое и компьютерное моделирование систем: прикладные аспекты. Том 1, вып. 1. Москва, Издательство «НИИСИ РАН», 2011. – с. 24-30.

Разработка радиационно-стойких микросхем и микромодулей статической памяти

С.А. Морозов, С.А.Соколов

Аннотация: В статье рассмотрены методы разработки радиационно-стойких микросхем и многокристальных модулей статической памяти емкостью от 1 Мбит до 32 Мбит для КНИ-технологии с проектными нормами 0,35 мкм и 0,25 мкм. Рассмотрены результаты моделирования статического запаса помехоустойчивости и сравнения геометрических размеров кристаллов СОЗУ для этих технологий. Рассмотрены конструктивные особенности построения многокристальных модулей памяти. Приведены результаты радиационных испытаний и исследований микросхемы СОЗУ.

Ключевые слова: микросхема, радиационная устойчивость, модуль статической памяти

Введение

Микросхемы статических оперативных запоминающих устройств (СОЗУ) емкостью от 1 Мбит до 32 Мбит с повышенной радиационной стойкостью требуют применения структур кремний-на-изоляторе (КНИ) с проектными нормами 0,25 мкм и 0,35 мкм, а также использования технологии микросборок и многокристальных модулей (МКМ) на основе унифицированных кристаллов памяти. Применение КНИ-структур также обеспечивает повышение сбоеустойчивости микросхем СОЗУ при действии тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), что является крайне важным при использовании в бортовой аппаратуре авиационной и ракетно-космической техники.

Применение таких микросхем памяти позволяет вести разработку новых поколений высокопроизводительных систем с расширенными функциональными возможностями и высокой стойкостью к накопленной дозе, а также отсутствием тиристорного эффекта при воздействии ТЗЧ во всем температурном диапазоне применения (от минус 60°С до +125°С).

1. Методы разработки радиационно-стойкой КНИ статической памяти

Для достижения радиационной стойкости не менее 200 Крад и стойкости к воздействию ТЗЧ для микросхем СОЗУ емкостью от 1 Мбит до 16 Мбит была использована КНИ-технология с проектными нормами 0,35 мкм и 0,25 мкм и применен комплекс технологических, схемотехнических, топологических и конструкционных решений, в том числе:

- разработка специального технологического процесса изготовления КНИ СБИС;
- исследование и моделирование факторов, ограничивающих радиационную стойкость КНИ СБИС [1,2];
- специальные конструкции транзисторов и схемные решения, устойчивые к изменениям электрических характеристик элементов;
- сбоеустойчивые базовые узлы СОЗУ;
- моделирование базовых транзисторных структур и критических топологических фрагментов, включая ячейку памяти (ЯП), в системе технологического моделирования TCAD;
- применение металлокерамических корпусов типа 4 по ГОСТ 17467, герметизируемых сваркой.
- конструирование микросборок и МКМ на основе унифицированных кристаллов памяти с гарантированным уровнем радиационной стойкости.

Метод разработки основан на решении ряда взаимосвязанных задач, а именно:

- достижение максимальной удельной информационной емкости за счет минимизации размеров ЯП;
- уменьшение времени чтения/записи за счет декомпозиции большого массива памяти на блоки емкостью 64-128 Кбит, что обеспечивает снижение паразитных емкостей на шинах считывания и записи данных;
- снижение токов потребления в динамическом режиме за счет применения метода, в котором при чтении и записи активируется только нужный фрагмент малой информационной емкости;
- снижение токов потребления в статическом режиме за счет применения транзисторов специальной конструкции и использования решений, максимально приближенных к цифровой схемотехнике;
- достижение устойчивой работы микросхем в широком температурном диапазоне за счет применения специальных схемотехнических решений;
- достижение высокой стойкости к разряду статического электричества за счет использования в элементах защиты специальных КНИ-структур с проверенными пробивными характеристиками.

Для повышения плотности упаковки, обеспечения однородности свойств и повышения выхода годных кристаллов СОЗУ, изготавливаемых по технологии КНИ 0,25 мкм, использованы методы топологической коррекции, обеспечивающие парирование эффектов оптической близости.

Для повышения устойчивости работы СОЗУ при малых временах обращения к массиву памяти в схему введен специальный блок, отслеживающий критические пути в трактах записи и чтения в условиях разброса (деградации) параметров, изменения температуры и напряжения питания. С теми же целями, а также для повышения помехоустойчивости использован уси-

литель считывания с высокой чувствительностью, построенный по дифференциальному принципу и устойчивый к деградационным изменениям под действием радиации.

Для повышения стойкости к электростатическому разряду применен метод выборочного пути, взамен метода случайного пути [3]. Согласно методу выборочного пути отвод стрессового тока заранее предсказан при всех возможных комбинациях стрессовых воздействий.

При разработке электрических схем базовых узлов СОЗУ были учтены радиационные эффекты от воздействия ТЗЧ на КНИ СБИС [4,5]. Для фильтрации помех, вызванных воздействием ТЗЧ, применены схемотехнические решения на основе С-элемента (рисунок 1) [6].

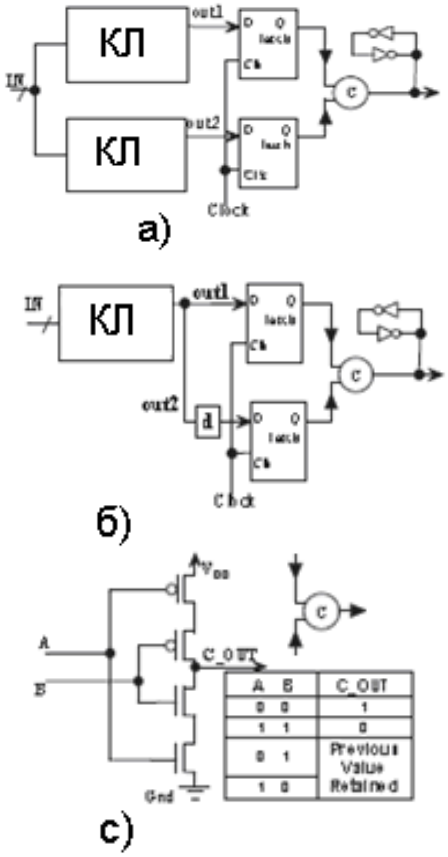


Рисунок 1. Схемотехнические решения на основе С-элемента для блокирования распространения помехи.

На рисунке 1 (с) приведена электрическая схема и обозначение С-элемента. На рисунках 1 (а) и 1 (б) КЛ – это комбинационная логика. С-элемент работает как инвертер, когда на обоих входах одинаковые логические уровни. Но, когда на входах разные логические уровни, С-элемент не позволяет ни одному из входных сигналов распространяться на выход.

Кроме того, был разработан сбоеустойчивый триггер, изображенный на рисунке 2.

Триггер состоит из двух «защелок», каждая из которых построена на сбоеустойчивых элементах. Проходной ключ построен подобно фильтрующему С-элементу. Вместо обычного инвертора используется триггер-Шмита. На выходе стоит тройной инвертор для обеспечения большей нагрузочной способности, а также для фильтрации помехи на выходе триггера.

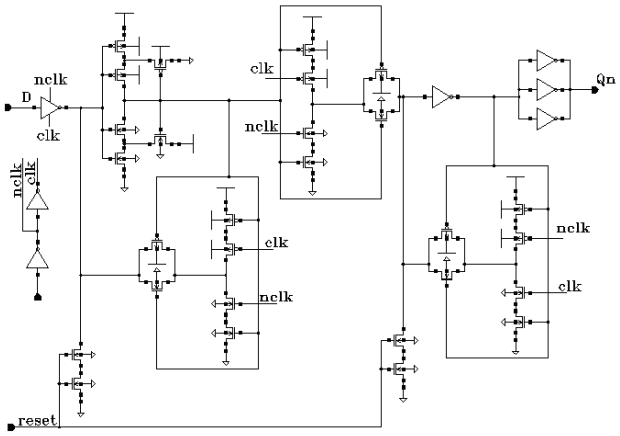
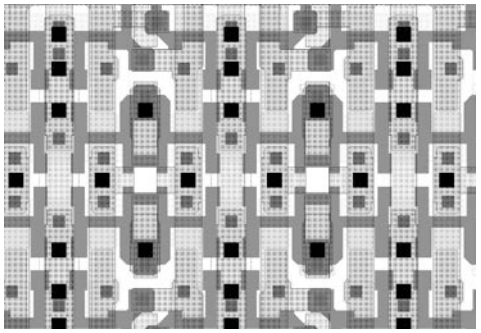


Рисунок 2. Сбоеустойчивый триггер.

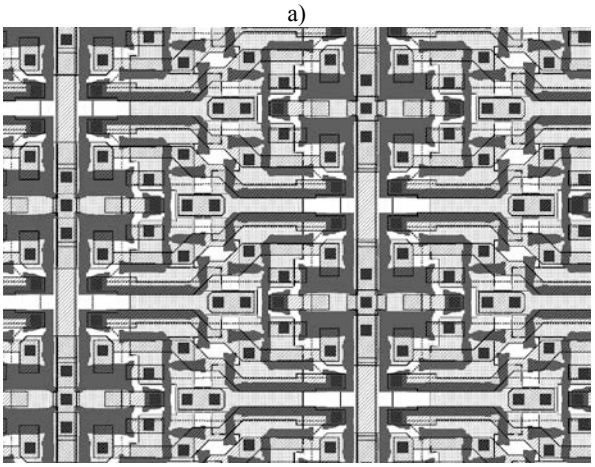
конструкции транзисторов А-типа, Н-типа и О-типа [1,2].

С учетом этого были разработаны кристаллы СОЗУ емкостью 1 Мбит (КНИ-технология, 0,35 мкм) и 4 Мбит (КНИ-технология, 0,25 мкм).

На рисунке 3 представлена топология ячеек памяти, примененная в кристаллах микросхем СОЗУ 1 Мбит и 4 Мбит. На рисунке 3, б изображена топология ЯП с элементами коррекции эффекта оптической близости. Площадь ячейки памяти кристалла СОЗУ 1 Мбит, изготовленного по технологии КНИ 0,35 мкм с четырьмя уровнями металлизации – 46 мкм^2 (X=5,75 мкм, Y=8 мкм). Площадь ячейки памяти кри-



а)

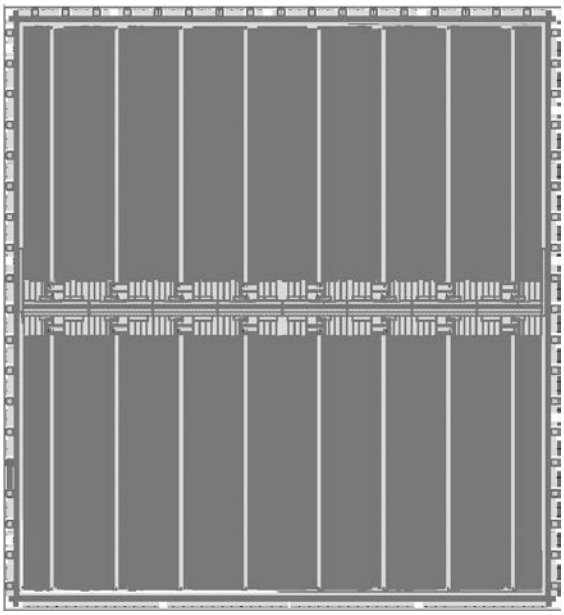


б)

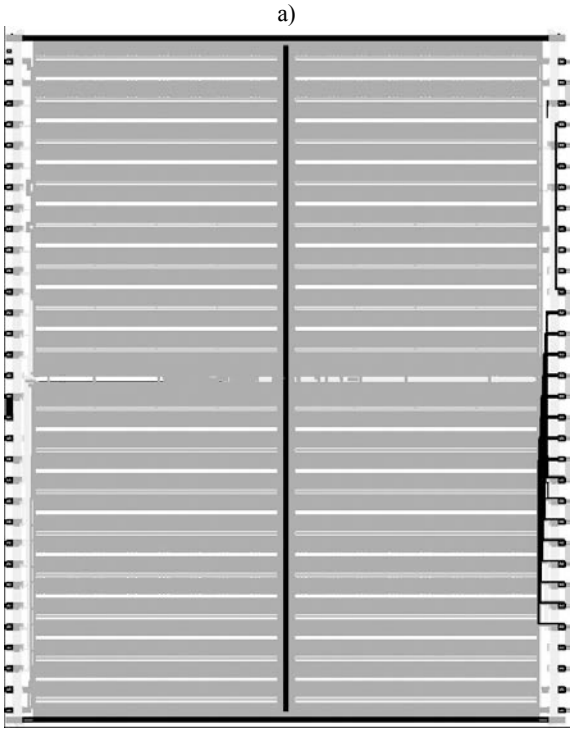
Рисунок 3. Топология ЯП: а) технология КНИ 0,35 мкм, б) технология КНИ 0,25 мкм.

сталла СОЗУ 4 Мбит, изготовленного по технологии КНИ 0,25 мкм с пятью уровнями металлизации – 23,5 мкм^2 (X=2,74 мкм, Y=8,58 мкм).

На рисунке 4 представлен общий вид кристаллов СОЗУ емкостью 1 Мбит с организацией 128 К×8 и СОЗУ 4 Мбит с организацией 512 К×8. Площадь кристалла СОЗУ 1 Мбит – 88,2 мм^2 (X=9 мм, Y=9,8 мм). Количество транзисторов более 6 млн. Площадь кристалла СОЗУ 8 Мбит – 129,5 мм^2 (X=10,2 мм, Y=12,7 мм). Количество транзисторов 26 млн. Время выборки и записи данных при худших условиях работы СОЗУ 1 Мбит не превышает 30 нс. Время выборки и записи данных при худших условиях работы СОЗУ 4 Мбит не превышает 20 нс.



а)



б)

Рисунок 3. Общий вид кристаллов микросхем:
а) 1 Мбит – технология КНИ 0,35 мкм,
б) 4 Мбит – технология КНИ 0,25 мкм.

2. Моделирование ячейки памяти для определения статического запаса помехоустойчивости

Статический запас помехоустойчивости ячейки памяти определяется в 3-х состояниях: хранения, записи и чтения. Стабильность работы ячейки памяти при чтении определяется соотношением делителя, построенного на проходном транзисторе nm1 и транзисторе nm2 (NMOS транзисторах в инверторе, рисунок 5) и

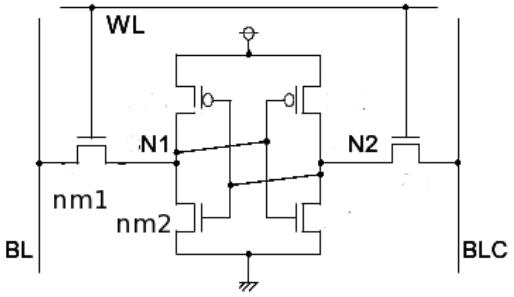


Рисунок 5. Ячейка памяти СОЗУ.

определяется параметром, который называется статический запас помехоустойчивости – SNM (Static Noise Margin) [7].

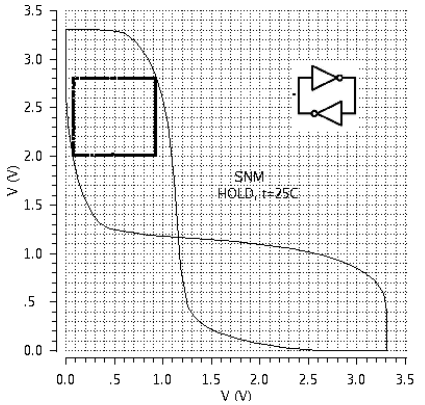
Эта величина определяется как минимальное напряжение на внутреннем узле ячейки памяти, необходимое для перебрасывания ячейки в противоположное состояние. На практике эта ситуация определяется топологическими размерами транзисторов и, графически, стороной вписанного квадрата при прорисовке кривых при расчете SNM в форме фигуры "бабочки".

Критерием оценки помехоустойчивости служат соотношения CR и PR, где CR=(W/L(nm2))/(W/L(nm1)) определяет коэффициент устойчивости ЯП при чтении, а PR=(W/L(pmos))/(W/L(nm2)) при записи. Обычно CR и PR выбирают от 1 до 3. В нашем случае PR близко к 1 (1,15) из-за удовлетворения требования по плотности компоновки топологии, а CR равно 2,1.

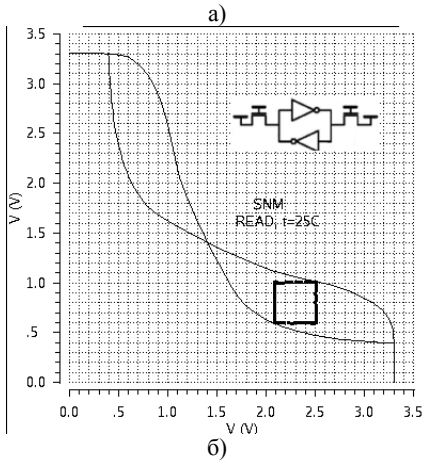
Случайные разбросы длины канала МОП-транзисторов, изменение концентрации легирования и толщины подзатворного окисла при изготовлении партий пластин, воздействие радиации приводят к изменению характеристик транзисторов и, соответственно, влияют на значение SNM.

На рисунке 6 представлены SNM для состояния хранения ЯП (Hold) и состояния чтения (Read) при температуре 25°C. Кривые получены при моделировании SNM с использованием программы SPECTRE САПР Cadence. Графически, SNM определяется стороной самого большого квадрата, вписанного в крылья "бабочки".

На рисунке 7 показаны результаты моделирования SNM в температурном диапазоне работы ячейки памяти от -60°C до +125°C и вариации SNM при изменении порогового напряжения на 10 %. Видно, что величина SNM при разбросе параметров уменьшается.

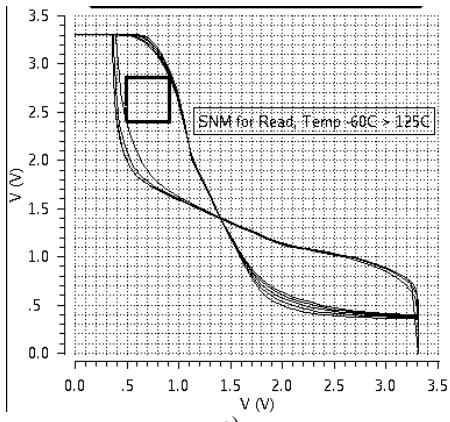


а)

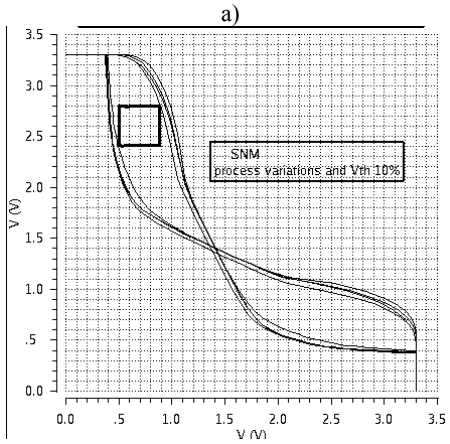


б)

Рисунок 6. SNM для состояния хранения (а) и состояния чтения (б) ЯП при температуре 25°С.



а)



б)

Рисунок 7. Моделирование SNM ячейки памяти:
а) SNM при чтении ЯП, температура от -60°С до +125°С;
б) SNM при изменении порогового напряжения транзисторов на 10%.

В последнее время для исследования стабильности ячеек памяти используют метод N-кривых. В отличие от SNM, который определяется чисто математически и графически, данный метод позволяет проверить все важные параметры ячейки памяти с помощью измерений.

В качестве примера на рисунке 8 представлено (между маркерами B и C) напряжение переключения ячейки памяти в противоположное состояние при записи.

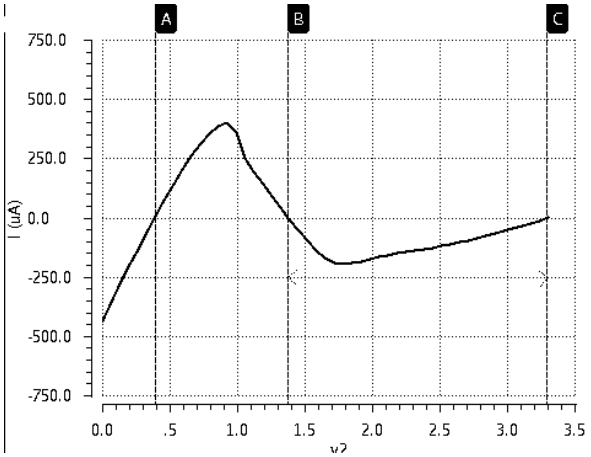


Рисунок 8. Напряжение переключения ЯП в противоположное состояние при записи.

Параметр напряжение переключения ячейки памяти между маркерами B и C называется запас по напряжению записи (Voltage Write Margin). Для рассматриваемой ячейки он равен 1,75 В. Напряжение между маркерами A и B определяет запас по напряжению чтения (Voltage Read Margin), которое определяет максимальную помеху на внутреннем узле ячейки памяти без изменения ее содержания.

Этот метод моделирования позволил разработать ячейку памяти, устойчивую как к технологическим вариациям технологического процесса изготовления СБИС СОЗУ, так и к разбросу питающих напряжений и температур с учетом радиационных воздействий.

3. Конструктивные особенности построения многокристальных модулей статической памяти

Для создания СОЗУ повышенной информационной емкости был использован метод сборки многокристальных модулей. Конструктивно-компоновочное решение многокристального модуля, примененное при создании СОЗУ емкостью 8 Мбит, приведено на рисунке 9.

Как видно на рисунке 9 (б), в состав МКМ входит один резервный кристалл микросхемы СОЗУ 1 Мбит, помеченный символом R. Поскольку разбраковка кристаллов на пластине не гарантирует исправности кристаллов во всем диапазоне температур (контроль на пониженной температуре технически невозможен), то в составе микросборки может оказаться неработоспособный кристалл, требующий замены. В связи с этим в состав МКМ был введен резервный кристалл, необходимый для замены бракованного кристалла. Введение

дополнительного 9-го кристалла, при выбранной компоновке, не привело к увеличению габаритов изделия.

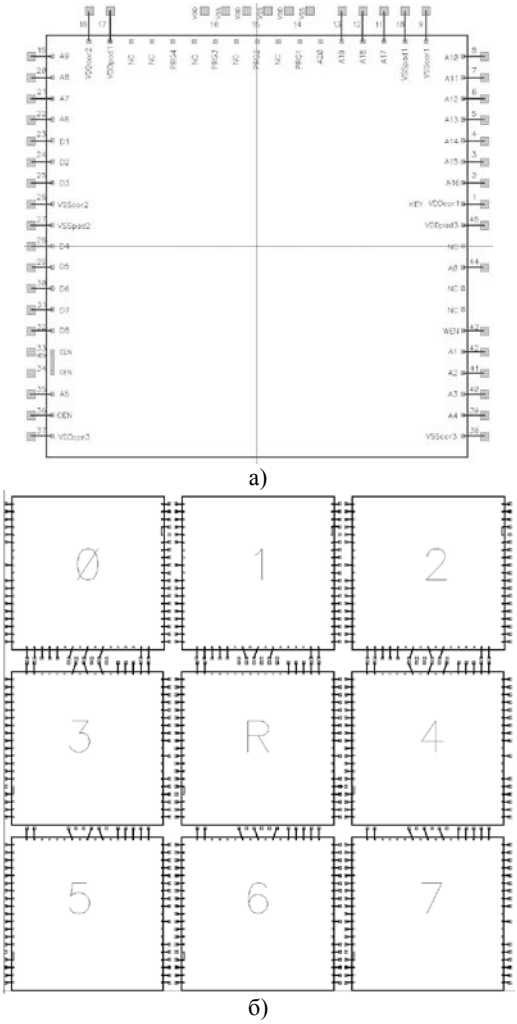


Рисунок 9. Конструктивно-компоновочное решение МКМ:
а) кристалл микросхемы СОЗУ емкостью 1 Мбит;
б) компоновка МКМ емкостью 8 Мбит.

Был разработан специализированный корпус, основание которого представляет собой многослойную коммутирующую структуру. При этом внутренняя геометрия корпуса максимально приближена к геометрии традиционных корпусов микросхем, что позволило использовать отработанный технологический процесс сборки. Особенностью разработанного корпуса является наличие монтажных площадок (колодцев) с металлизированным основанием для каждого из 9-ти кристаллов (рисунок 10).

Металлизированные основания соединены между собой и выведены на отдельный траверс корпуса. Вокруг каждого монтажного колодца расположены контактные площадки, предназначенные для разварки проволочных соединений кристалл-корпус. Это обеспечивает минимальную длину проволочных соединений. Для повышения технологичности все контактные площадки корпуса расположены на одном уровне и исключают необходимость выполнения соединений кристалл-кристалл.

При разработке топологии межсоединений были решены две основные задачи:

- достижение минимальных значений емкостей и сопротивлений в сигнальных цепях для обеспечения максимального быстродействия;
- обеспечение максимально возможной емкости между шинами земли и питания для подавления помех по цепям питания.

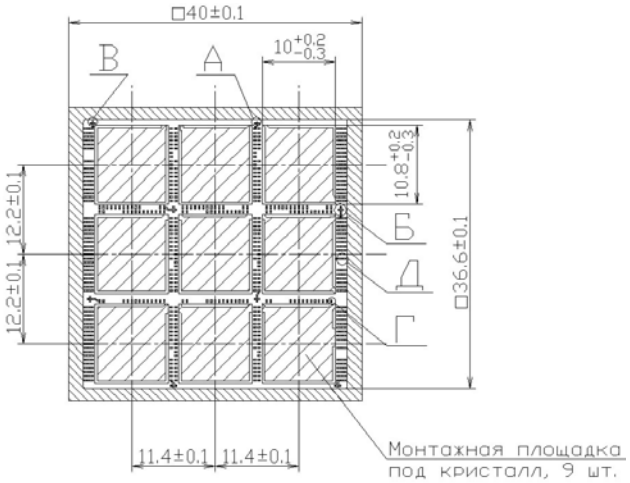


Рисунок 10. Расположение монтажных площадок в корпусе МКМ

Время выборки и записи данных при худших условиях работы многокристальных модулей по результатам испытаний составило менее 60 нс. Уровень стойкости к электростатическому разряду для МКМ по результатам испытания составил не менее 4 кВ.

Учитывая потребность в СОЗУ различной организации, при разработке кристалла микросхемы объемом 4 Мбит были приняты конструктивно-компоновочные решения, обеспечивающие дополнительную возможность создания как устройств большей разрядности (16 и 32). Конструктивно-компоновочное решение кристалла СОЗУ 4 Мбит, приведено на рисунке 11.

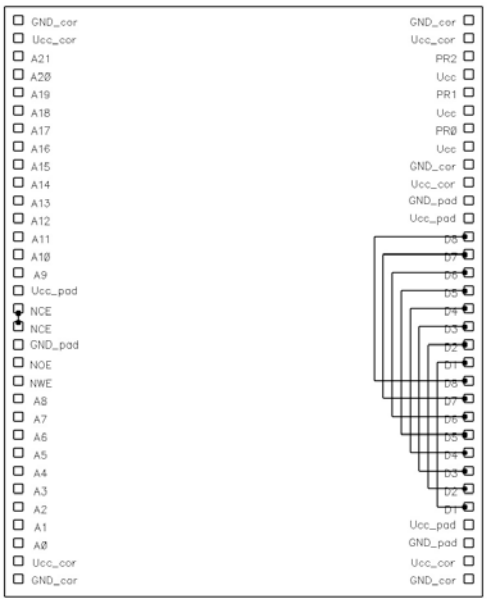


Рисунок 11. Конструктивно-компоновочное решение кристалла СОЗУ 4 Мбит.

Как видно из рисунка, слева расположены адресные сигналы (A21-A0) и сигналы управления (NCE, NWE, NOE), справа расположены сигналы данных (D8-D1) и управляющие сигналы (PR2, PR1, PR0). Входы старших разрядов адресных сигналов (A21-A19) и сигналов управления привязаны к общему уровню («земля») и могут использоваться при создании следующих типов СОЗУ:

- СОЗУ емкостью 8 Мбит с организацией 1 М×8;
- СОЗУ емкостью 16 Мбит с организацией 2 М×8;
- СОЗУ емкостью 32 Мбит с организацией 4 М×8.

В этом случае сигналы A21-A19 используются для расширения адресного пространства, а сигналы PR2, PR1, PR0 для программирования требуемого кристалла. Так как сигналы PR2, PR1, PR0 привязаны к общему уровню («земля»), то для выбора соответствующего кристалла (условие выбора: A21=PR2, A20=PR1, A19=PR0) необходимо разварить контактную площадку соответствующего сигнала PR2, PR1, PR0 (для которой требуется обеспечить зашивку на питание UCC) с соседней внизу контактной площадкой UCC (см. рисунок 11, справа вверху). Дублирование контактной площадки сигнала NCE эффективно при построении архитектур СОЗУ большой емкости с включением резервных кристаллов. Для резервного кристалла одна из контактных площадок NCE разваривается на сигнал питания (UCC). В случае замены негодного кристалла на резервный, в негодном кристалле отрывается провод разварки контактной площадки NCE на сигнал NCE, вторая контактная площадка NCE разваривается на сигнал питания (UCC). Для подключения резервного кристалла в нем отрывается провод от контактной площадки NCE на сигнал питания (UCC), вторая контактная площадка NCE разваривается на сигнал NCE.

Важной особенностью конструктивно-компоновочного решения является дублирование контактных площадок 8-разрядной шины данных D8-D1 (справа на рисунке 11) с целью достижения высокого быстродействия за счет минимизации паразитных соединений при создании СОЗУ с конфигурацией:

- СОЗУ емкостью 8 Мбит с организацией 512 К×16;
- СОЗУ емкостью 16 Мбит с организацией 512 К×32.

Выбранная конструкция кристалла позволяет использовать его не только при одноуровневом монтаже, но и при двухуровневом размещении, что позволяет существенно уменьшить габариты устройства. Пример такого варианта использования показан на рисунке 12.

На рисунке 12 (а) представлен эскиз разварки нижнего кристалла, а на рисунке 12 (б) верхнего кристалла в корпус для МКМ.

4. Результаты радиационных испытаний и исследований СОЗУ

Для микросхемы СОЗУ 1 Мбит были проведены радиационные испытания (по результатам испытаний стойкость к накопленной дозе составила более 200 Крад.), а также было проведено исследование одиночных событий. Установлено, что величина сечения

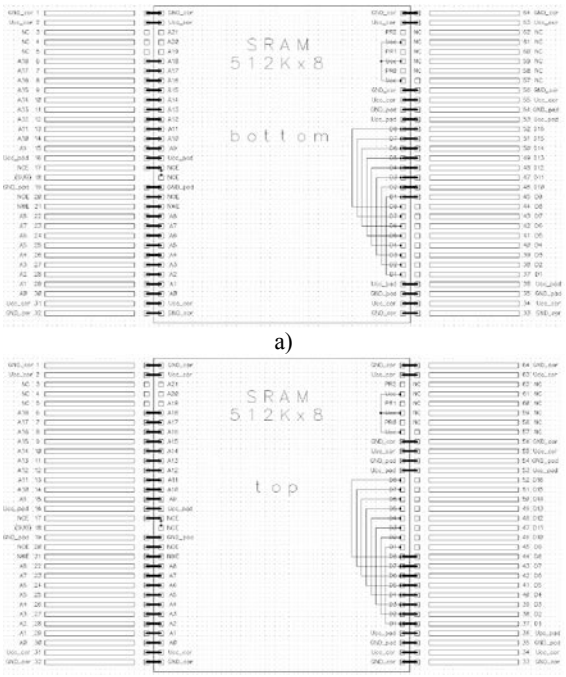


Рисунок 12. Эскиз сборки кристаллов в корпус для МКМ:
а) сборка нижнего кристалла;
б) сборка верхнего кристалла.

сбоя для СОЗУ 1 Мбит при воздействии нейтронов с энергией 14 Мэв (энергия ТЗЧ атома кремния 7 МэВ) составила $1{,}8\cdot10^{-9}$см^2. Удельное сечение сбоя – $1.7\cdot10^{-15}$см^2/бит.

Заключение

В работе проанализированы перспективные методы разработки радиационно-стойких микросхем памяти в корпусном варианте и с использованием технологии сборки многокристальных модулей. Рассмотренная методика определения статического запаса помехоустойчивости – SNM позволяет оптимизировать топологические параметры ячейки памяти и оценить поведение ячейки памяти как по допустимому диапазону разброса технологических параметров, так и при разбросе напряжения питания и температуры.

Рассмотренные конструктивные особенности построения многокристальных модулей памяти позволяют создать микросхемы статической памяти повышенной информационной емкости (до 32 Мбит) при достижении высокого быстродействия и минимальных габаритных размеров.

Проведенные результаты радиационных испытаний и исследований микросхемы СОЗУ 1 Мбит подтвердили эффективность предложенных методов проектирования и оценки разброса параметров, как при наборе накопленной дозы, так и при воздействии тяжелых заряженных частиц – ТЗЧ.

The development of radiation hardened static RAM

S.A. Morozov, S.A. Sokolov

Abstract. In the article are examined the methods of developing radiation-resistant SRAM capacity from 1 Mbit to 32 Mbit for silicon on the insulator (SOI) technology with design rules 0,35 micron and 0,25 micron. Considered the results of simulation and SNM comparison geometric dimensions memories for SOI technology with design rules 0,35 micron and 0,25 micron. The design features of building multi-chip memory modules were investigated. The results of radiation testing and examination of SRAM were received.

Keywords: chip, radiation resistance, static memory module

Литература

1. С.И. Волков, А.А. Глушко, С.А. Морозов. Исследование и моделирование факторов, ограничивающих радиационную стойкость КНИ СБИС. // Труды НИИСИ РАН. Математическое и компьютерное моделирование систем: прикладные аспекты. Т.1. №1. – Москва, Издательство «НИИСИ РАН», 2011. – с. 51-56.

2. С.И. Волков, С.А. Морозов Конструктивно-технологический базис радиационно-стойких сложно-функциональных КНИ БИС.// IX Межотраслевая конференция по радиационной стойкости. Сборник докладов в двух частях. Часть 1, 2010. – с. 67-71

3. С.А. Морозов. Исследование и моделирование метода выборочного пути для защиты КНИ КМОП СБИС от электростатического разряда. // Труды НИИСИ РАН. Математическое и компьютерное моделирование систем: прикладные аспекты. Т.1. №1. – Москва, Издательство «НИИСИ РАН», 2011. – с. 24-30.

4. С.А. Морозов, С.А. Соколов. Радиационные эффекты при воздействии тяжелых заряженных частиц КНИ СБИС и способы их моделирования. // Труды НИИСИ РАН. Математическое и компьютерное моделирование систем: прикладные аспекты. Т.1. №2. – Москва, Издательство «НИИСИ РАН», 2011. – с. 47-51.

5. С.И. Волков, С.А. Морозов, А.П. Степовик, Е.Ю. Шамаев, В.П. Шукайло. Исследование эффекта одиночного сбоя в КНИ БИС при облучении нейтронами с энергией 14 МэВ. // IX Межотраслевая конференция по радиационной стойкости. Сборник докладов в двух частях. Часть 1, 2010. – с. 107-112

6. S. Mitra, N. Seifert, M. Zhang, Q. Shi, and K. S. Kim. Robust System Design with Built-In Soft-Error Resilience. – Vol. 38, No. 2, pp. 43–52, IEEE Computer, February 2005.

7. E.Seevinck, F.J.List, J.Lohstroh, "Static-Noise Margin Analysis of MOS SRAM Cells" IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.22, No.5, pp.748-754, October 1987

.

.

Среда для подготовки программ функционального контроля

К.К. Смирнов, М.Д. Бубнова

Аннотация: Разработана специальная среда FTStudio (Functional Test Studio) для разработки программ функционального тестирования для оборудования Agilent 93000, Aehr MAX3B и др., которая позволяет существенно повысить уровень автоматизации процесса разработки и испытания микросхем. Функциональные возможности и гибкость данной среды позволяют: широко применять ее при проведении различных исследовательских работ, снизить трудоемкость подготовки программ тестирования и сократить время разработки исследовательских тестов.

Данная среда также используется при проведении диагностики и периодической аттестации измерительного оборудования и позволяет существенно снизить время проведения периодической аттестации с обеспечением возможности 100% контроля параметров.

Ключевые слова: программа, тестирование, микросхема

Введение

При разработке микросхем существует устойчивая тенденция к увеличению степени интеграции. Это приводит к появлению большого количества случайных дефектов при производстве, повышению чувствительности элементов интегральных схем к воздействию внешних факторов и относительно высокой интенсивности отказов и сбоев в процессе эксплуатации. Случайные скрытые дефекты материалов микросхем не поддаются обнаружению при существующих методах технического контроля. Поэтому для их выявления используется функциональный контроль (ФК) [1].

Функциональный контроль представляет собой совокупность тестов основных функциональных параметров микросхем по заданному алгоритму. Алгоритмы ФК разрабатываются на основе математической модели, соответствующей каждому типу микросхем.

Сами функциональные тесты весьма разнообразны для каждой модели. К ним относят, например: архитектурные тесты, проверяющие соответствие модели разрабатываемой архитектуре, тесты отдельных функциональных узлов, позволяющие хотя бы один раз изменить состояние каждого разряда регистра или ячейки памяти с единицы на ноль и наоборот, и выполнить соответствующую функцию. Так для проверки памяти применяются тесты «бегущая» единица, когда во всю память записываются нули, а затем побитно записывается и считывается единица; «бегущий» ноль (обратный тест); шахматный код (чередуются единицы и нули) и пр.

Также в тестах функционального контроля должны предусматриваться: автоматический контроль выполнения тестов с записью полного состояния микросхемы в случае сбоя и возможность пошагового выполнения тестов, выдача (сохранение на диске или в базе данных) состояний микросхемы в запрашиваемые моменты времени [2]. Отсюда следует, что с усложнением тестируемых изделий, значительно возрастает сложность разработки алгоритмов ФК, трудоемкость которых зачастую существенно больше трудоемкости разработки аппаратной части микросхем.

Ввиду широкого спектра изготавливаемых НИИСИ РАН изделий электронной техники и ввиду того что разработка и модификация программ функционального тестирования является неотъемлемой составляющей деятельности сектора электрических измерений, задачи по автоматизации процесса работы с тестовыми воздействиями весьма актуальны.

На различном оборудовании, таком как стенд функционального контроля интегральных микросхем на базе Agilent 93000, на оборудовании для проведения электротермотренировки (ЭТТ MAX3B) и диагностического контроля (блоках функционального контроля – БФК), могут использоваться одни и те же программы тестирования или их фрагменты. Однако, использующиеся в настоящее время средства для генерации и редактирования тестовых векторов накладывают ряд существенных ограничений на возможности конвертации их между различными типами оборудования, а также являются чрезвычайно трудоемкими и не всегда реализуемыми.

Отсюда возникает необходимость в автоматизированной системе проектирования для разработки функциональных тестов, программ диагностического контроля и управления измерительным оборудованием.

1. Функциональные возможности среды FTStudio

Среда представляет собой среду разработки программ функционального контроля и управления тестовым и измерительным оборудованием, где любой тест можно описать в виде алгоритма. В нее встроены инструменты, позволяющие импортировать и экспортировать программы с различного оборудования.

Разработанная система позволяет:

- при помощи встроенного языка программирования высокого уровня разработать алгоритмы проверки устройств, т.е функциональные тесты;

Рис.1. Поддерживаемые форматы оборудования

- максимально просто и быстро модифицировать уже существующие программы тестирования;
- описывать временные параметры сигналов;
- определять логические уровни сигналов;
- просматривать созданный алгоритм тестирования или его фрагмент в виде таблицы или временной диаграммы;
- сгенерировать программу для любого поддерживаемого оборудования, список которого может быть легко расширен благодаря возможности расширения среды FTStudio;
- осуществлять мультиформатный импорт и экспорт проектов, разработанных для различного измерительного и испытательного оборудования в среду FTStudio (рисунок 1);
- осуществлять работу с аппаратными моделями изделий;
- работать с оборудованием подключенным к портам USB, RS-232, GP-IB и Ethernet, с возможностью сохранения состояний отдельных сигналов;
- оформлять исходный код алгоритмов в виде библиотек и вторично использовать их в других проектах;
- объединять наборы функциональных и параметрических тестов в программы тестирования;
- сохранять и просматривать подробную информацию об ошибках, возникающих в ходе тестирования.

Для простоты ознакомления пользователя с широкими возможностями системы и ее инструментами в FTStudio предусмотрен подробный справочник с примерами готовых типовых программ.

Присутствующие в интерфейсе программы механизмы автозавершения кода и подсветки синтаксиса делают написание программы более удобным, а сам код – более читаемым и наглядным. Главное окно программы приведено на рисунке 2.

1.1. Поддержка работы с аппаратными моделями

Из всех перечисленных функциональных возможностей среды FTStudio одним из самых мощных инструментов является поддержка работы с аппаратными моделями изделий. По сути, этот инструмент дает разработчику возможность работать с реальным изделием. Так, например, получив при помощи FTStudio тестовый вектор эталонного изделия, на основе полученных данных можно проводить исследование функциональных отказов изделий, а также отлаживать программы тестирования данного типа изделий непосредственно в среде разработки. Таким образом, среда FTStudio содержит в себе функции логического анализатора.

Важной особенностью разработанной системы является наличие встроенных инструементов для отладки функциональных тестов и работы с оборудованием. Одним из таких инструментов является триггер, позволяющий выполнять определенные действия при совпадении выходных сигналов устройства с требуемой последовательностью.

В качестве примера функционирования логики работы триггера приведена, программа для формирования последовательности «011001» на сигнале A5, каждый раз, когда на A1 появляется 10001101, в FTStudio выглядит следующим образом:

```
//последовательность, которая будет сгенерирована
#signal “S”, “011001”, false
//Ожидаем на сигнале A1 последовательность 1001101
A1.Wait("1001101").Start(()=>{cycle.Generate(A5, S)});
```

Результат компиляции программы в виде временной диаграммы приведен на рисунке 3.

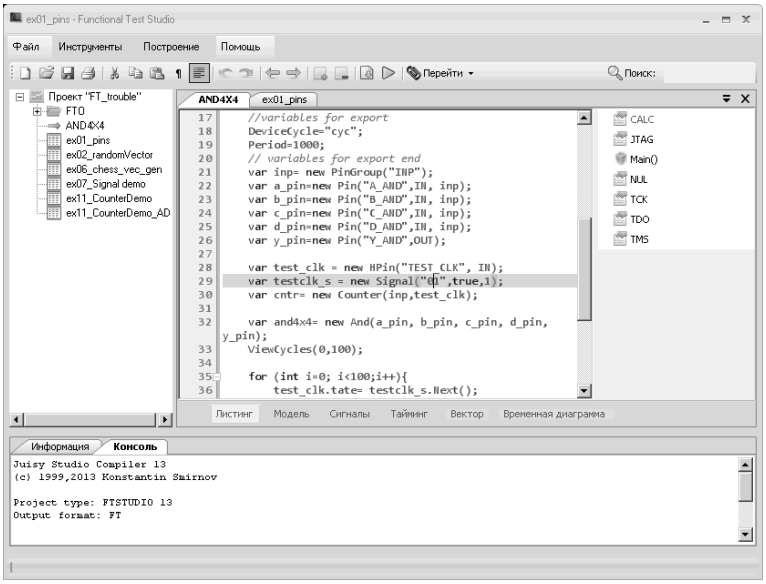


Рис. 2. Главное окно программы FTStudio

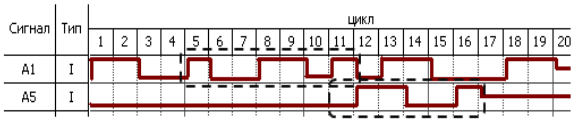


Рис. 3. Генерация последовательности “011001” на сигнале A5 при наступлении события на сигнале A1

Из приведенного примера очевидна простота функционирования предложенного инструмента.

1.2. Пользовательские библиотеки алгоритмов

Не мало важной особенностью среды FTStudio является возможность вторичного использования кода алгоритмов тестирования. Так любой алгоритм на языке высокого уровня или импортированная тестовая последовательность могут быть оформлены пользователем в виде библиотеки и использоваться повторно в других проектах.

Пользовательская библиотека представляет собой скомпилированный двоичный файл проекта, включающий в себя все созданные в результате компиляции объекты (списки сигналов, состояний, групп, тестовый вектор) и все применяемые алгоритмы.

Для доступа к любому скомпилированному модулю, достаточно импортировать файл в проект и обратится к нему из кода программы, вызывая необходимые методы или объекты.

2. Возможности среды FTStudio для разработки программ функционального контроля

FTStudio и используемый в ней язык программирования позволяют максимально гибко и быстро разрабатывать программы любой сложности: основанный на синтаксисе C++ и C#, язык среды оптимизирован специально для разработки тестовых воздействий. Так, создание 4-х разрядного счетчика (включающее в себя также действия по формированию сигнала CLOCK), осуществляется максимально просто и не требует написания большого объема кода. В коде программы допускается применение оператора #import, позволяющего использовать информацию из внешних файлов, таких как файлы описания выводов тестируемого изделия или тестовый вектор, созданные для поддерживаемого оборудования:

```
//Импорт информации о тестируемом изделии в формате Agilent 93000
#import "pinifo.pc"

void Main(){
//счетчик, подключенный к шине DATA и управляемый сигналом clk
 #counter "cnt", "DATA", "clk"
 //описываем последовательность с именем clkSignal
 #signal "clkSignal", "01", true, 1
 //создаем тест, состоящий из 4096 циклов
 for (int i=0; i<4096; i++){
 clk.state = clkSignal.Next();
  Next();
  }
    return;
}
```

Корректность работы счетчика возможно отследить по временной диаграмме представленной на рисунке 4:

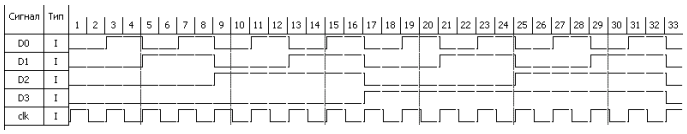


Рис. 4 Результат проверки разработанного четырех разрядного счетчика

Благодаря простоте используемого языка описания алгоритма тестирования, такие «базовые» операции, как, например, перебор адреса от 0h до FFFFFh, реализуются в несколько строк:

#BUS "AD", 20 *//Создаем 20-разрядную шину*
#counter c, AD *//создаем счетчик и подключаем к нему шину AD*

В среде FTstudio предусмотрены возможности модификации уже существующих программ функционального тестирования и переноса фрагментов программ на другое оборудование.

Так, модификация уже существующих программ тестирования выполняется максимально просто и наглядно. На основе существующих программ тестирования сигналы можно исключать или комбинировать, а также совершать с ними логические операции (инверсия, конъюнкция и проч.). На уровне встроенного языка описания алгоритмов тестирования реализована логика функционирования основных базовых логические элементов, таких, как триггер, счетчик, регистр, шифратор, дешифратор, что существенно упрощает процесс разработки функциональных тестов.

В качестве примера приведена, модификация исходной программы теста, заключающаяся в исключении одного из входных сигналов, и включении логических операндов AND и NOT на выход. Исходный код проекта в этом случае выглядит следующим образом:

#steel
//Подключаем существующий тест MyFTSTest как модуль с именем M
module “M”, MyFTSTest
//описываем входные сигналы теста IN0..IN3
pin *IN[4], IN*
//и коммутируем их с входными сигналами теста MyFTTest:
connect IN0, M["D0"]
connect IN1, M["D2"]
connect IN2, M["D3"]
connect IN3, M["D4"]
//описываем выходные сигналы теста OUT0..OUT3
pin *OUT[4], OUT*
//и коммутируем их с выходными сигналами теста MyFTTest:
connect M["Q0"], *Out0*
connect M["Q3"], *Out2*
//Устанавливаем на выходы исходного теста MyFTStest элемент AND и соединяем его выход с выходом OUT1:
and M["Q0"], M["Q1"], M["Q2"], OUT1
//Инвертируем сигнал Q4 исходного теста и коммутируем его с выходом OUT3:
not M["Q4"], OUT3
#end

Схематически полученный тест изображен на рисунке 5. Подобная гибкость FTStudio позволяет реализовать любые типы связей внутри теста.

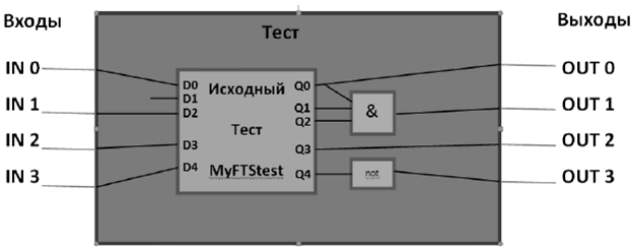


Рис. 5. Тест, построенный на основе другого теста

Задачи подобного плана могут возникнуть при объединении нескольких тестов, предназначенных для тестирования с ипользованием стенда функционального контроля интегральных микросхем на базе логических анализаторов с малым числом каналов (например, Agilent 83000) в один тест для логического анализатора с большим числом каналов (например, Agilent 93000).

Любой объект в FTStudio пригоден как для формирования тестовых последовательностей, так и для работы с реальным устройством, подключенным к персональному компьютеру.

Например, один и тот же встроенный инструмент может быть использован как для разработки теста для последовательного порта микросхемы, так и для работы с реальным последовательным портом. По сути, разработчику теста достаточно задать подаваемые и ожидаемые данные в ASCII формате, при этом необходимость в ручном декодировании протокола исчезает (рисунок 6).

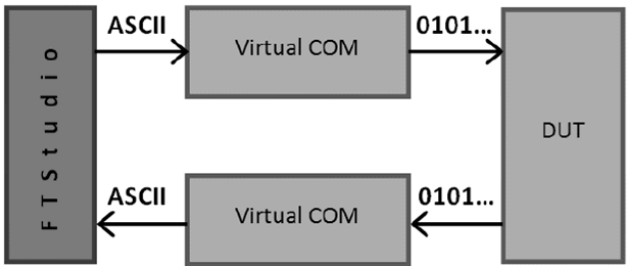


Рис. 6. Декодирование последовательностей последовательного порта

Такой подход может быть использован для проверки журнала тестирования, получаемого по последовательному порту, например при проведении диагностического контроля микросхем при котором на модуле с испытуемой микросхемой запускается операционная система Linux с набором функциональных тестов. Как видно, из примера, задача разбора журнала тестирования и решение исследовательских задач, таких как измерение электрических параметров, снятие осциллограммы сигналов в автоматическом режиме при появлении определенного сообщения в журнале тестирования решается в разработанной среде довольно просто:

var COM = new Serial(профиль порта);
Serial.Rx.WaitS("*Linux Error*").Start(()=>{WriteLn("*Ошибка*")});

Видно, что при разработке табличных тестов и аппаратных тестов используется один и тот же подход.

В среде FTStudio можно разрабатывать и более сложные, универсальные модули, оперирующие как сигналами, так и другими данными.

Например, может быть разработан виртуальный модуль, декодирующий сигналы последовательной шины JTAG в набор текстовых команд и обратно (рисунок 7).

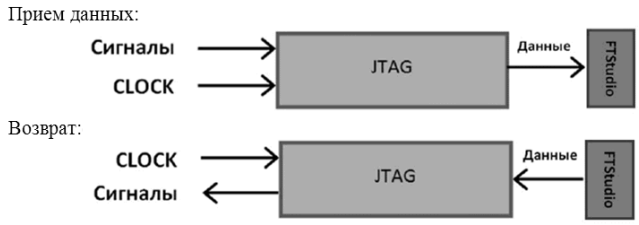


Рис. 7. Декодирование сигналов шины JTAG

Важно отметить наличие в системе средств моделирования, которые позволяют разработчику отлаживать создаваемые им модули и виртуальные устройства. Такие инструменты могут быть помещены в библиотеку инструментов, что сделает их доступными в других проектах.

Среда FTStudio предоставляет возможность работы с оборудованием, подключенным через последовательный порт, шину USB или по протоколу TCP/IP(через виртуальное устройство MaxLab Host). При таком подключении виртуальные сигналы соединяются с аппаратными сигналами устройств (Рисунок 8). Для удобства работы с оборудованием, разработчик программы имеет возможность, для смены текущего цикла, использовать любой внешний сигнал.

Используя данные возможности можно выполнять съем карты ошибок оборудования или строить таблицы истинности и временные диаграммы работы конкретного оборудования.

3. Пример модификации теста для проведения электротермотренировки в среде FTStudio

Рассмотрим пример создания нового теста для проведения электротермотренировки на основе существующего, в котором сигнал TDO будет инвертирован, и добавлен сигнал SUM, представляющий собой дизъюнкцию входных сигналов TDI, TCK, TMS, CLK, а сигнал TEST исходного теста более не должен контролироваться.

Представим задачу в виде функциональной схемы, приведенной на рисунке 9:

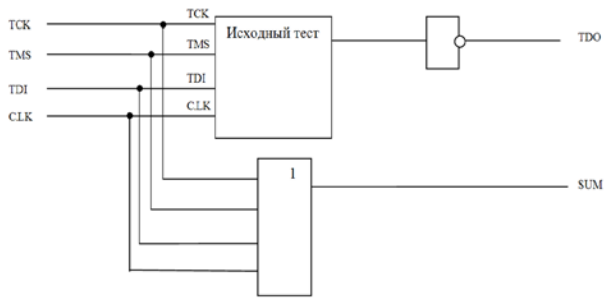


Рис. 9. Функциональная схема нового теста, разработанного на основе другого теста

Для решения подобной задачи в FTStudio необходимо импортировать старый тест, задать для него имя и описать функциональную схему. В этом примере импортированный тест имеет имя MAX3.

```
#region Объявление выводов
#group "JTAG"
#pin "TCK", IN, JTAG
#pin "TDI", IN, JTAG
#pin "TDO", OUT, JTAG
#pin "SUM", OUT, JTAG
#pin "TMS", JTAG
#pin "NUL"
#pin "CALC", IN
#endregion

void Main(){
//импортируем модуль  "max3" в проект:
 #using max3
 //Схема соединений
 #steel
 //инвертируем сигнал TDO, объявленный в импортируемом модуле:
not "notElement", /*вход*/max3["TDO"], /*выход*/ TDO
 //Соединяем входные сигналы проекта с входами FTO:
 connect  max3["TCK"], TCK
 connect  max3["TMS"], TMS
 connect  max3["NUL"], NUL
 connect  max3["CLC"], CLC
  //TDO с  модуля max3 подадим на вход TDI проекта
 connect max3["TDO"], TDI
  //Ставим на входные сигналы логический элемент "ИЛИ"
  or "orElement", /*Входы*/TDI, TCK, TMS, NUL, CLC, /*Выход*/ SUM
  #end
    //Генерируем вектор. При генерации возьмем конечное число циклов равным числу циклов max3
for (; max3.Pos<max3.Cycles;){
 max3.Next();//Переход в модуле max3 на следующий цикл
//Аналогично тому, если бы мы на вход CLK max3 кратковременно установили бы высокий уровень
```

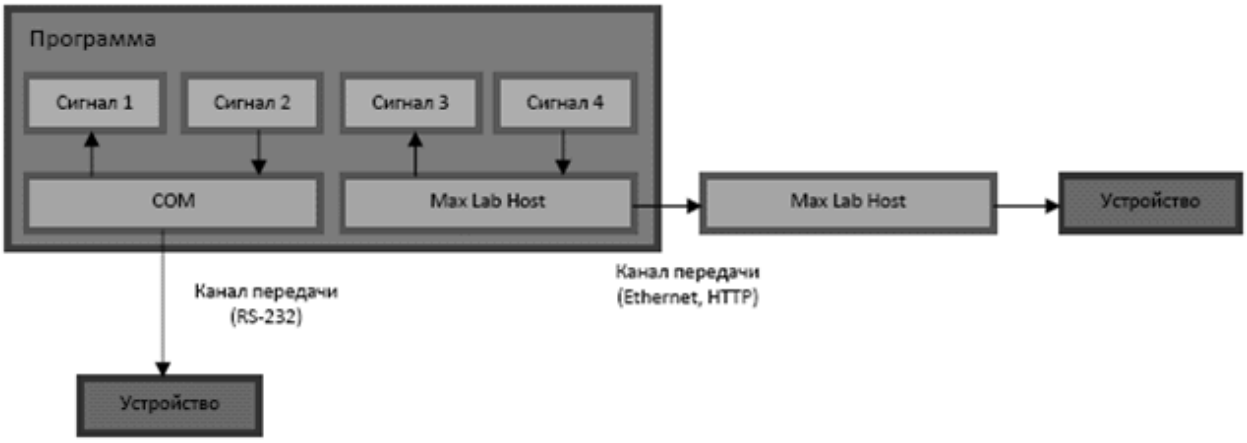


Рис. 8. Работа в среде FTStudio в реальным оборудованием

```
Next();  //Записываем состояния в новый вектор
 }
return;//выход из программы
}
```

Результат компиляции алгоритма можно просмотреть в виде таблицы или временной диаграммы (рисунок 10).

Время компиляции данного проекта составляет менее 5 секунд. Получившийся тест можно экспортировать в любой из поддерживаемых системой форматов (Agilent 93000, MAX3) или построить на его основе новые тесты.

4. Разработка тестов памяти в среде FTStudio

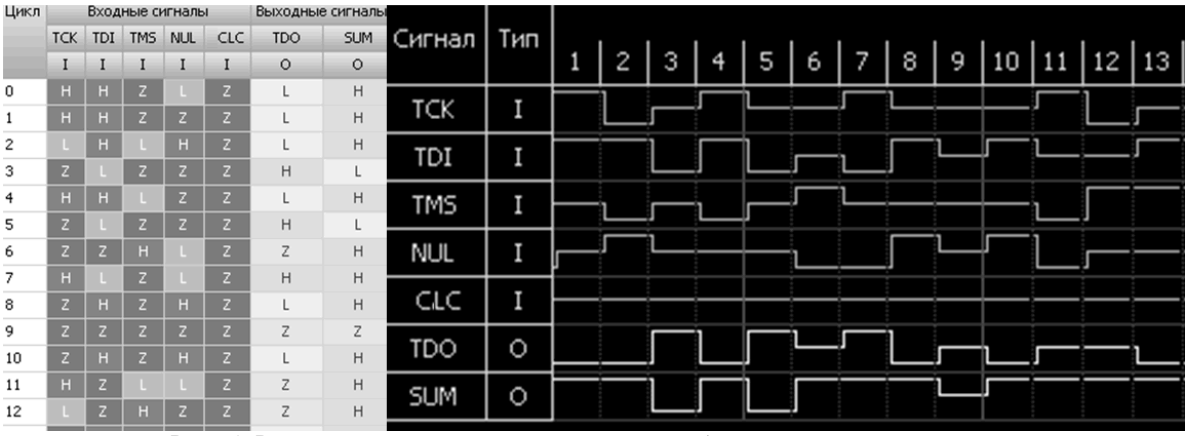
Разработанная среда FTStudio используется для разработки тестов памяти и программ тестирования для модуля тестирования микросхем СОЗУ, разрабатываемых в НИИСИ РАН. Важной особенностью системы является возможность подготовки теста сразу для нескольких различных единиц оборудования, учитывая их индивидуальные особенности. Например, разработанный тест может быть экспортирован на оборудование Agilent 93000 для проведения функционального контроля на пластине или на оборудование MAX3B для проведения электротермотренировки микросхем.

FTStudio поддерживает непосредственную работу с модулем тестирования памяти микросхем, что позволяет производить запуск тестов и их отладку непосредственно из среды разработки с возможностью установки точек останова в коде и обработку пользовательских событий. Данная возможность позволяет, например, автоматически снять осциллограмму сигналов на сбойных циклах или произвести замер тока потребления при возникновении сбоя в определенном диапазоне адресов памяти.

Помимо отдельного теста, в среде можно разработать программу тестирования, содержащую алгоритм запуска отдельных тестов при различных напряжениях питания и частоте тестирования и запуск тестов контроля электропараметров. При этом отдельные тесты, для удобства разработчика, могут быть вставлены в виде откомпилированного алгоритма теста либо в виде исходного алгоритма. В режиме отладки разработчику теста доступна функция просмотра карты ошибок на топологической модели кристалла микросхемы, что дает возможность локализации ошибок, связанных с топологией.

Пример, реализации теста CHESS в среде FTStudio

```
const byte ADR_PIN_LIM=5; //Разрядность шины адреса
const byte DATA_PIN_LIM=9; //Разрядность шины данных
// Объявляем сигналы тестируемой схемы
```



Цикл	Входные сигналы					Выходные сигналы	
	TCK	TDI	TMS	NUL	CLC	TDO	SUM
	I	I	I	I	I	O	O
0	H	H	Z	L	Z	L	H
1	H	H	Z	Z	Z	L	H
2	L	H	L	H	Z	L	H
3	Z	L	Z	Z	Z	H	L
4	H	H	L	Z	Z	L	H
5	Z	L	Z	Z	Z	H	L
6	Z	Z	H	L	Z	Z	H
7	H	L	Z	L	Z	H	H
8	Z	H	Z	H	Z	L	H
9	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
10	Z	H	Z	H	Z	L	H
11	H	Z	L	L	Z	Z	H
12	L	Z	H	Z	Z	Z	H

Рис. 10. Результат компиляции алгоритма в виде таблице и временной диаграммы

Цикл	Входные сигналы								Двунаправленные сигналы																	
	AD0	AD1	AD2	AD3	AD4	nce	noe	nwe	dat0		dat1		dat2		dat3		dat4		dat5		dat6		dat7		dat8	
	I	I	I	I	I	I	I	I	I	O	I	O	I	O	I	O	I	O	I	O	I	O	I	O	I	O
15	H	H	H	H	L	W	W	W	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X
16	L	L	L	L	H	W	W	W	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X
17	H	L	L	L	H	W	W	W	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X
18	L	H	L	L	H	W	W	W	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X
19	H	H	L	L	H	W	W	W	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X
20	L	L	H	L	H	W	W	W	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X
21	H	L	H	L	H	W	W	W	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X
22	L	H	H	L	H	W	W	W	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X
23	H	H	H	L	H	W	W	W	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X
24	L	L	L	H	H	W	W	W	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X
25	H	L	L	H	H	W	W	W	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X
26	L	H	L	H	H	W	W	W	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X
27	H	H	L	H	H	W	W	W	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X
28	L	L	H	H	H	W	W	W	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X
29	H	L	H	H	H	W	W	W	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X
30	L	H	H	H	H	W	W	W	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X	L	X
31	H	H	H	H	H	W	W	W	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X	H	X
32	L	L	L	L	L	R	R	R	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H
33	H	L	L	L	L	R	R	R	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L
34	L	H	L	L	L	R	R	R	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H
35	H	H	L	L	L	R	R	R	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L
36	L	L	H	L	L	R	R	R	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H
37	H	L	H	L	L	R	R	R	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L
38	L	H	H	L	L	R	R	R	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H
39	H	H	H	L	L	R	R	R	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L
40	L	L	L	H	L	R	R	R	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H
41	H	L	L	H	L	R	R	R	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L
42	L	H	L	H	L	R	R	R	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H
43	H	H	L	H	L	R	R	R	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L
44	L	L	H	H	L	R	R	R	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H
45	H	L	H	H	L	R	R	R	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L	Z	L
46	L	H	H	H	L	R	R	R	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H	Z	H

Рис. 11. Фрагмент теста памяти

```
#steel
//Шина адреса
BUS "AD", "AD", ADR_PIN_LIM
//Шина данных
BUS "DATA", "dat", IO, DATA_PIN_LIM
//Управляющие сигналы
 pin "nce",IN
 pin "noe",IN
 pin "nwe",IN
 //Задаем новые состояния сигналов
 state State.W,L
 state State.R,H
 #end

#region вспомогательные переменные и константы
int i, adr, adr_tmp;
byte rw_cyc;
uint ADR_SERV=0x01;
const byte CYC_WRITE=0;
const byte CYC_READ=1;
#endregion
uint ADR_LIM = ADR_SERV<<(ADR_PIN_LIM);

for(byte inv=0;inv<2;inv++){
for(rw_cyc=CYC_WRITE;rw_cyc<CYC_READ+1;rw_cy
c++) {
for(adr=0;adr<ADR_LIM; adr++) {
adr_tmp=adr;
for(i=0; i<ADR_PIN_LIM;i++) {

if((adr_tmp%2)==0){AD[i].state=L;}else{AD[i].state=H;}
adr_tmp=adr_tmp>>1;
}
if((adr%2)==((adr>>4)%2)) {
//dat=0xFF;
for(i=0;i<DATA_PIN_LIM;i++) {
if(rw_cyc==CYC_WRITE) {
if(inv==0){DATA[i].state=H;}else{DATA[i].state=L;}
}
else {
if(inv==0){DATA[i].Out=H;}else{DATA[i].Out=L;}
}
}
} else {
 //dat=0x00;
for(i=0;i<DATA_PIN_LIM;i++) {
if(rw_cyc==CYC_WRITE) {
```

```
f(inv==0){DATA[i].state=L;}else{DATA[i].state=H;}
}
Else {
if(inv==0){DATA[i].Out=L;}else{DATA[i].Out=H;}
}
 }
  }
            if(rw_cyc==CYC_WRITE) {
                nce_pin.state=State.W;
                nwe_pin.state=State.W;
                noe_pin.state=State.W;
            }
            else
            {
                //assuming read process if not write
                nce_pin.state=State.R;
                nwe_pin.state=State.R;
                noe_pin.state=State.R;
            }
            Next();
        }
    }
}
```

Фрагмент созданного теста приведен на рисунке 11.

5. Диагностика измерительного оборудования в среде FTStudio

В разработанной среде реализована возможность для работы с оборудованием подключенным к портам USB, RS-232 и Ethernet. Так в 2012 году на базе FTStudio разработана программа диагностики оборудования для проведения электротермотренировки микросхем MAX3B (рисунок 12). Программа позволяет, используя разработанный в НИИСИ РАН стенд диагностики MAX3B провести поверку оборудования полностью в автоматическом режиме с возможностью контроля параметров каждого сигнального канала оборудования. Использование разработанной программы совместно со стендом диагностики позволило существенно сократить время проведения периодической аттестации и дало возможность проводить 100% поверку всех каналов оборудования.

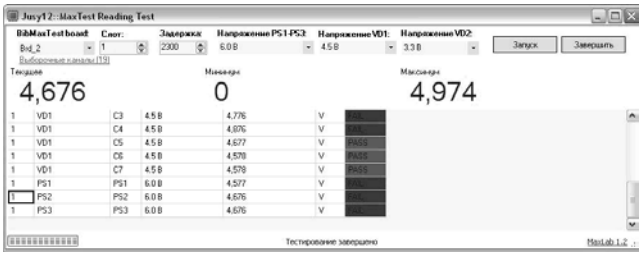


Рис. 12. Окно тестирующей программы, разработанной в FTStudio

Выводы

Разработанная сектором электрических измерений НИИСИ РАН система автоматического проектирования функциональных тестов способна существенно сократить время при решении сложных задач адаптирования и разработки функциональных тестов.

Использование высокоуровневого языка программирования автоматизирует процесс написания программ, а концептуально заложенная в среду гибкость позволит в перспективе добавлять новые форматы устройств, свободно расширяя список поддерживаемого измерительного оборудования.

Integrated development environment for functional test programs

K.K. Smirnov, M.D. Bubnova

Abstract. The paper presents an overview of integrated development environment for functional test programs FTStudio (Functional Test Studio). This IDE is designed to help in development functional tests for different kind of apparatus e.g. Agilent 93000 and MAX3B. Flexibility and wide number of functions in this program are very useful in research, developing special kinds of functional tests and test programs. IDE aids in decreasing laboriousness of test program development.

This IDE is also used during the periodic calibration of measurement-related apparatus. It allows performing attestation much faster especially in case of 100% parametric tests.

Keywords: program, testing the chip

Литература

1. Н.К. Жердев, Б.П. Креденцер, Р.Н. Белоконь. Контроль устройств на интегральных схемах, Техника 1986.
2. С.Г. Бобков Маршрут проектирования микросхем серий 1890 и 1990. Часть 1, Электронные компоненты, №5, 2008

Организация прослеживаемости предметов труда при проведении функционального контроля СБИС

К.К. Смирнов, Е.Н. Ефимов

Аннотация: В статье рассматриваются вопросы обеспечения прослеживаемости предметов труда при проведении функционального контроля СБИС в условиях производства. Для решения этой проблемы разработано специализированное программное обеспечение, обеспечивающее прослеживаемость предметов труда, а так же осуществляющее обработку, анализ и представление результатов. Приведены примеры выполнения анализа результатов измерений, так же рассмотрено решение ряда специфичных для производства задач.

Ключевые слова: СБИС, функциональный контроль, программное обеспечение, прослеживаемость предметов труда.

Разработка и изготовление высокосложных микросхем охватывает широкий спектр производственных задач, связанных с проверками и испытаниями изделий (пластины с кристаллами микросхем или заказанных элементов, микросхемы, корпуса микросхем) на различных этапах их производства, определяемых как предметы труда. От оперативности и качества выполнения этих испытаний зачастую зависит весь производственный цикл. К таким испытаниям относятся: проверка электрических параметров, функциональный и диагностический контроли, электротермотренировка, измерение емкостных параметров микросхем. Кроме того, в большинстве случаев необходима разработка новых конструктивных решений, обеспечивающих качественное выполнение данных операций. Одной из важных задач при этом является получение детальной информации в процессе проводимых измерений для успешной подготовки корректирующих мероприятий.

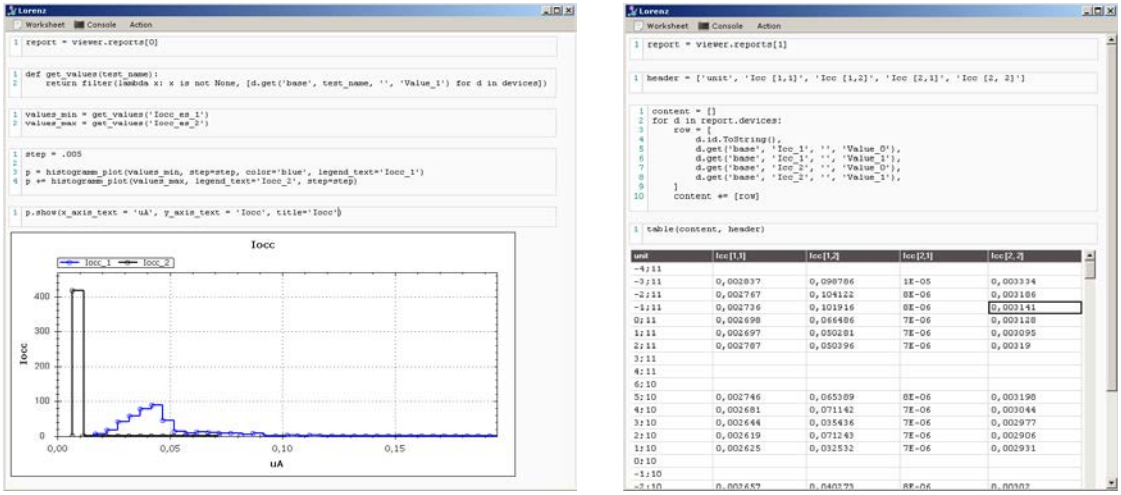
Функциональный контроль микросхем на технологическом комплексе НИИСИ РАН проводится на специализированном оборудовании измерения параметров СБИС и анализа полупроводниковых структур Agilent 93000, в состав которого включены средства для формирования файлов отчетов с результатами измерений в формате GDF (*Generic Data Format*). Использование данного формата обосновано в случае, если имеют место короткие измерительные программы тестирования с небольшим количеством результатов измерений. Производство высокосложных микросхем предъявляет повышенные требования к тестированию и проверке качества [1]. В связи с этим растет размер тестовых последовательностей (*Test Pattern*) программ и объем выходных данных, предоставляемых разработчикам микросхем для анализа качества изделий, как в автоматизированном режиме, так и в произвольных формах для решения исследовательских задач [2]. Входящие в состав программного обеспечения оборудования Agilent 93000 средства для формирования отчетов в формате GDF с ростом сложности программ резко ограничиваются в размере обрабатываемых данных до 256 тестов. Такое ограничение было достигнуто при тестировании ряда микросхем, разработанных НИИСИ РАН. Для решения этой проблемы был разработан специальный универсальный формат хранения результатов функционального контроля RSTL (*Report Standard Test Library*) повышенной надежности, способный оперировать произвольным объемом данных, расширенными типами данных.

Формат RSTL, созданный как универсальный формат, может быть использован в любых других системах, поддерживающих самостоятельное формирование файлов отчетов. Кроме того, данный формат был использован для хранения результатов на следующих операциях и производственных процессах:

- выполнение диагностического контроля микросхем;
- операция оплавления шариковых выводов;
- измерение сопротивления выводов микросхем;

а) б) в)

Рисунок 1. Окна программы Verigy Viewer, представляющие различные данные: а) карта годности пластины, б) индивидуальные для каждого вывода микросхемы значения измерений некоторого параметра, в) таблица значений параметров для кристаллов пластины



а) б)

Рисунок 2. Использование встроенного языка скриптов Python для анализа результатов измерений и представ-

- измерение емкости микросхем;
- функциональный контроль;
- диагностика оборудования.

Наследуя концепции, используемые Agilent 93000 в формате GDF, разработанный формат RSTL позволяет сохранять информацию о: предметах труда (пластины, кристаллы, микросхемы), параметрах используемого оборудования и программы тестирования, параметрах окружающей среды.

В условиях современного производства важна прослеживаемость, т.е. обеспечение сотрудникам, принимающим участие в процессе анализа результатов измерений параметров предметов труда, единообразного доступа к результатам. Для этих целей была разработана специальная программа просмотра, анализа и визуализации результатов измерений Verigy Viewer, учитывающая особенности построения программ функционального контроля для оборудования Agilent 93000 и иного измерительного оборудования. Программа поддерживает все используемые на производстве форматы хранения результатов, представляя результаты в едином виде.

Основные задачи, решаемые программой Verigy Viewer:

- построение таблицы результатов;
- построение таблицы значений по выводам;
- построение карт годностей пластин;
- анализ результатов измерений [3].

Программа Verigy Viewer, помимо информации, входящей в файлы отчетов формата Agilent GDF, такой как результаты измерений параметров микросхемы, отдельные результаты измерений по её выводам. Программа использует дополнительную информацию из файлов RSTL:

- таблицы результатов;
- графики;
- карты ошибок [4];
- графические изображения.

В частности, таблицы и графики используются для сохранения информации об изменении температуры камеры при оплавлении шариковых выводов микросхем, а так же при измерении электрофизических параметров тестовых структур параметрического монитора.

Программа Verigy Viewer снабжена набором инструментов, предоставляющим в распоряжения пользователя различные способы подхода к анализу.

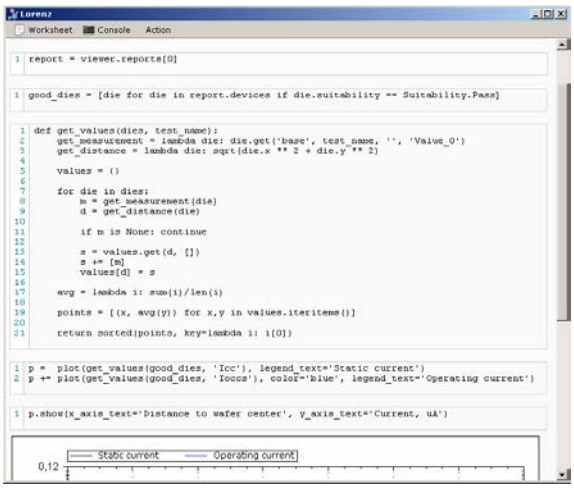
Например, анализ распределения параметра по пластине можно произвести непосредственно в программе, воспользовавшись соответствующим инструментом, выполненным в виде ряда диалоговых окон и форм. Другой возможностью анализа является применения языка Python для написания произвольного скрипта анализа данных. Данный язык используется в качестве внутреннего языка скриптов, при этом программа Verigy Viewer предоставляет в распоряжения пользователя дополнительные классы и методы для вывода данных (например, в виде таблицы, графика, гистограммы или карты годности пластины). Прямым следствием использования внутреннего языка скриптов является возможность написания собственного модуля для экспорта результатов измерения в произвольный текстовый или бинарный формат. Впоследствии данные в таком виде могут быть использованы для анализа в любой другой программе. По умолчанию, большинство данных может быть экспортировано в виде таблиц Excel, либо изображений формата PNG.

Рассмотрим в качестве примера анализ распределения нескольких параметров микросхемы по пластине. Допустим, отчет с результатами измерений открыт в программе Verigy Viewer, тогда, запустив встроенный интерпретатор Python и выполнив соответствующий код, получим окно программы в виде, приведенном на рисунке 3.

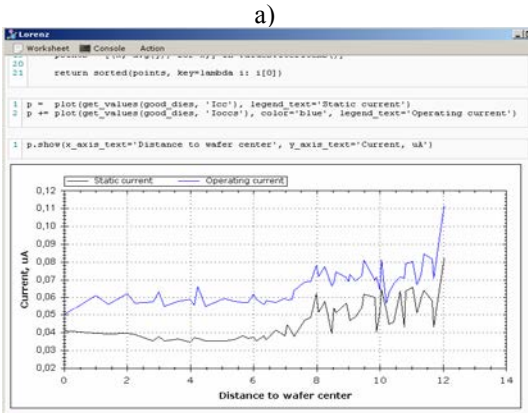
Следует отметить, что дизайн окна программы разработан так, что исходный код чередуется с результатом его выполнения в графическом виде, что позволяет итеративно вносить правки в код и, в итоге, получить требуемый алгоритм с промежуточными результатами. Исходный код сохраняется в файл. Фрагменты кода так же могут быть сохранены в файлы-библиотеки для повторного использования.

Возможность обращаться одновременно к результатам измерений различных операций позволяет проводить межоперационный анализ данных. Например, возможно провести корреляционный анализ результатов электрических измерений и функционального контроля микросхем на пластине совестно

с ее результатами электрофизических измерений на разных этапах её производства. При помощи программы Verigy Viewer также возможна подготовка отчетов, включающих только выбранные пользователем категории результатов измерений. Отчеты затем могут быть экспортированы в формат Excel.



а)



б)

Рисунок 3. Окно программы после выполнения пользовательского скрипта: а) область видимости кода, б) область видимости графиков

В качестве дополнительного инструмента анализа данных в программу включена возможность построения топологической модели СБИС семейства статических оперативных запоминающих устройств (*СОЗУ*), представляющей собой «банки памяти». Тестирование пластин с кристаллами СБИС СОЗУ производится на установке Agilent 93000 по специальному алгоритму при помощи специально подготовленного теста. В том случае если СБИС содержит какие-либо дефекты, выявляемые данным алгоритмом, в процессе тестирования некоторые циклы теста дадут сбои. Номера этих циклов затем могут быть преобразованы в координаты сбойных ячеек СОЗУ на топологической модели. В настоящее время используются такие известные алгоритмы тестирования памяти, как Chess, Galrow и March. На рисунке 4 показано окно программы с картой топологической модели кристалла СОЗУ 1 Мбит, поостренной по результатам теста Chess.

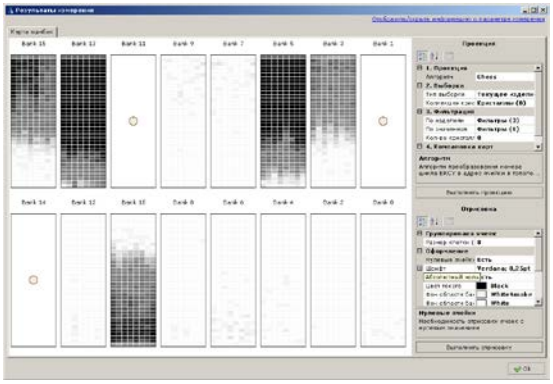


Рис. 4. Окно программы с картой топологической модели кристалла СОЗУ 1 Мбит, построенной по результатам теста Chess

Также необходима возможность интегрального анализа кристаллов всей пластины для выделения повторяющихся сбоев. Для этого добавлена возможность учитывать при анализе либо все кристаллы, пластины, либо только кристаллы, удовлетворяющие заданным условиям (например, по годности, результату определенного теста или по наличию в списке, сформированным пользователем вручную). В программе присутствует возможность указания граничного значения числа ошибок в некоторой ячейке СОЗУ для отсечения редких сбоев и концентрации внимания на наиболее частых случаях. Визуальное отображение топологической карты так же может быть различным. Наиболее важным является возможность выбора цветовой схемы (правила преобразования из числа ошибок в цвет ячейки на карте).

Так же дополнительным инструментом первоначального анализа результатов измерений является возможность построения карты распределения любого параметра микросхемы по пластине. Этот инструмент позволяет визуально наблюдать тенденции изменения измеряемого параметра микросхемы в его привязке к геометрии пластины (рисунок 5).

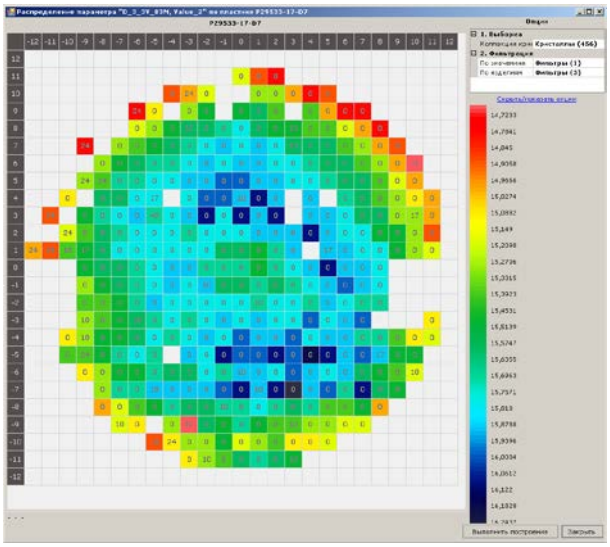


Рисунок 5. Распределение параметра задержки переключения СОЗУ 1 Мбит по пластине

Отчеты с результатами измерений, формируемые на различных этапах производства предметов труда хранятся в архиве в разных форматах. Для удобства доступа реализован интерфейс поиска отчетов по их метаданным (например, по номерам пластин или номерам сопроводительных листов).

Для получения информации со всего измерительного оборудования, используемого при функциональном контроле на технологическом комплексе НИИСИ РАН, разработаны специальные программы-клиенты, взаимодействующие с программой Verigy Viewer, которые позволяют проводить оценку результатов в режиме реального времени. Одной из таких программ-клиентов является тест-мониторная система (ТМС) Kernel Test. Основное окно программы ТМС Kernel Test представлено на рисунке 6.

ТМС Kernel Test предназначена для автоматического тестирования микросхем с целью повышения производительности и минимизации влияния человеческого фактора при оценке результатов измерения параметров микросхем [5]. Ввиду резко возросшего числа микросхем в такой же пропорции возросло число блоков их функционального контроля с различными методиками тестирования.

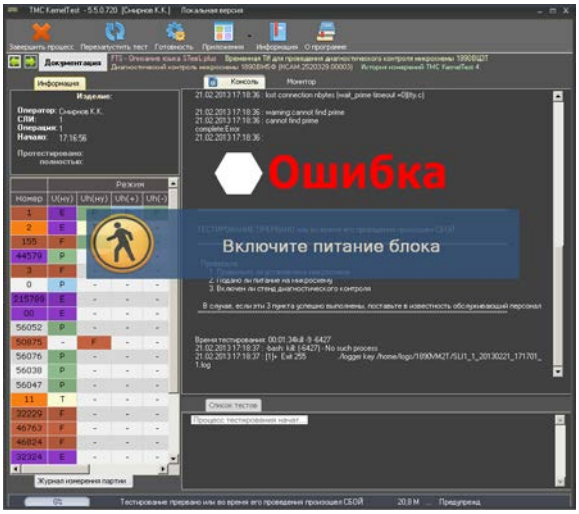


Рисунок 6. Основное окно программы ТМС Kernel Test

ТМС KernelTest способна работать в двух режимах: в режиме самостоятельной оценки результатов посредством описанного алгоритма тестирования или посредством удаленного подключения к сторонней программе тестирования. Данная возможность делает систему прозрачной для операторского и обслуживающего персонала и позволяет сохранять результаты тестирования в единообразном виде.

Появление функционально-сложных микросхем, таких как коммутатор каналов параллельного RAPID IO 1890КП3Я, работающих на высокой частоте потребовало измерения электрических параметров при проведении функционального контроля. С этой целью, начиная с версии 4.7, ТМС KernelTest поддерживает работу с измерительным оборудованием по стандартным протоколам. В версии 5 была значительно изменена инфраструктура системы, переработано ядро и улучшен пользовательский интерфейс. Для удобства работы в системе появилась поддержка информационных «виджетов» и мини-приложений, позволяющих оператору иметь быстрый доступ к технологической документации, проводить оценку состояния оборудования и результатов тестирования на всех рабочих местах. Также, для минимизации рабочего пространства, в свернутом состоянии ТМС Kernel Test, все его основные функции представляются в виде «виджетов» рабочего стола, что дает возможность оператору осуществлять мониторинг системы даже при сворачивании главного окна системы.

В последних версиях ТМС Kernel Test появился журнал готовности оборудования и технологических режимов (рисунок 7), в котором отражается готовность того или иного режима и измерительного оборудования. Данный журнал также отражает важную информацию о том, к какой рабочей станции подключен конкретный блок функционального контроля (БФК) (в случае его подключения через RS-232 или USB) или с какой рабочей станции в настоящий момент идет мониторинг (в случае подключения БФК через Ethernet к серверу БФК). Для исключения ошибок оператора, в ТМС KernelTest реализована возможность автоматически скрывать режимы, которые не поддерживаются данной рабочей станцией или для которых не установлена готовность.

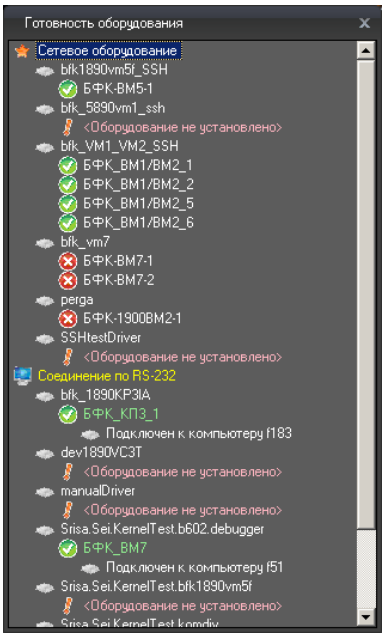


Рис. 7. Журнал готовности блоков функционального контроля

В этой версии также сделан упор на обслуживание и диагностику ТМС KernelTest, которая является сложной сетевой системой и в которой результаты тестирования, процессные программы, конфигурация, документация и модули расширения расположены в локальной сети. В режиме администрирования отображается сетевое окружение со всеми рабочими станциями в сети, на которых установлена ТМС KernelTest и все поддерживаемое оборудование (БФК, серверы БФК, измерительное оборудование).

Также система фиксирует все возможные несоответствия (рисунок 8). Обслуживающий персонал имеет возможность просмотра информации по несоответствиям для любой рабочей станции или оборудования, находящегося в сети. Для удобства работы, реализована развитая система фильтров по рабочим станциям, пользователям и датам.

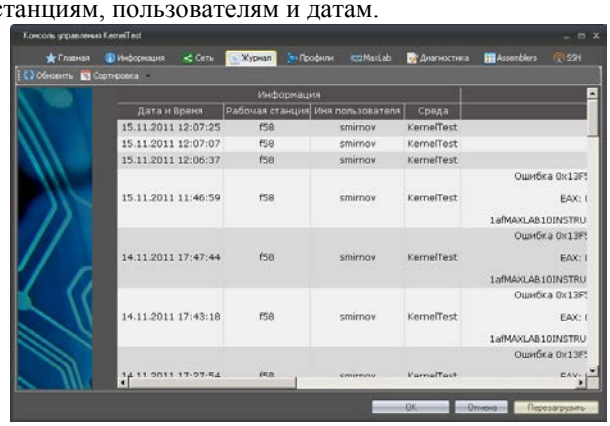


Рис. 8. Окно программы Kernel Test в режиме отображения несоответствий

В режиме администрирования обслуживающий персонал имеет возможность устанавливать новые процессные программы тестирования микросхем и драйверы соответствующего БФК, а также производить конфигурацию всего измерительного оборудования в сети.

- .

Для оперативного решения различных несоответствий, в систему встроен модуль диагностики, который сканирует всю инфраструктуру (измерительное оборудование, серверы БФК, рабочие станции ТМС KernelTest, находящиеся в сети) на наличие ошибок. В случае обнаружения каких-либо проблем система проинформирует об этом обслуживающий персонал и предложит варианты решения проблемы. В разрабатываемой в настоящее время системе шестой версии предполагается включение поддержки проведения операции на пластинах с кристаллами микросхем, а также поддержка тестирования микросхем СОЗУ.

Помимо ТМС KernelTest, для организации прослеживаемости изделий на различных этапах их производства разработаны следующие программы-клиенты:

- библиотека для построения программ тестирования для оборудования Agilent 93000;
- программы-сборщики данных для измерения параметров емкости микросхем и сопротивления изоляции корпусов;
- программа-клиент для задания режима и мониторинга операции оплавления шариковых выводов на корпусах BGA микросхем;
- программа указания номеров пластин с кристаллами микросхем для зондовой установки UF200

Organizing VLSI units traceability during functional testing processes in production

K.K. Smirnov, E.N. Efimov

Abstract: This article overviews possible approach to organize VLSI units traceability during functional testing processes in production environment by designing special software. Such software will perform necessary actions to preserve information about units during different kind of tests and in doing so will organize traceability. As an additional option, result analysis, processing and presentation tools are embedded. Article also contains some examples of analysis and solution of some specific production issues.

Keywords: VLSI, functional check, software, traceability of work object

Литература

1. J. Hudec Methodology of functional test synthesis and verification for VLSI systems, Information Technology Interfaces, 2000. ITI 2000.
2. С.Г. Бобков Маршрут проектирования микросхем серий 1890 и 1990. Часть 1, Электронные компоненты №5, 2008.
3. Verigy V93000 Manual "Results Analysis", 2007, p. 28.
4. N. Elmqvist Hierarchical Aggregation for Information Visualization: Overview, Techniques, and Design Guidelines, IEEE Transactions on visualization and computer graphics, vol. 16, no. 3, May/June 2010.
5. С.Г. Бобков Методика тестирования микросхем для компьютеров серии “багет”, Программные продукты и системы №3, 2007.

Проблемы проведения контрольных испытаний высокосложных микросхем в условиях мелкосерийного производства

Е.С. Темников

Аннотация: Рассмотрены производственные и технические проблемы проведения периодических испытаний высокосложных микросхем в условиях единичного и мелкосерийного производства. Предложен новый подход к реализации принципов конструктивно-технологического подобия путем адресного подхода к отдельным подгруппам испытаний, позволяющий резко сократить объемы испытаний при сохранении достоверности оценок стабильности производственного процесса.

Ключевые слова: микросхема, контрольное испытание, достоверная оценка стабильности

Каково происхождение понятия «базовый технологический процесс»? Вопрос можно поставить даже еще шире – почему, по мере усложнения микроэлектронной компонентной базы, оказалась остро востребованной унификация ее технических решений? Что, собственно, вообще означает этот термин, и почему его введение потребовалось спустя почти полвека успешной работы отечественной микроэлектронной промышленности без его использования?

Принято считать, что затраты на контроль качества серийно выпускаемых сложных интегральных микросхем (операционный контроль, отбраковки и контрольные испытания – квалификационные, приемосдаточные и периодические) составляют от одной третьей до половины себестоимости изготовления продукции. При этом, проведение периодических испытаний, направленных на контроль «качества продукции и возможности продолжения ее выпуска» [1], составляет значимую часть этих затрат и требует привлечения значительных производственных мощностей даже при массовом производстве микросхем относительно невысоких степеней интеграции. При производстве современных высокосложных микросхем, в особенности, специального назначения, эти затраты существенно возрастают вследствие относительного снижения объемов выпуска при непрерывном расширении номенклатуры и возрастании сложности изделий, подлежащих испытаниям. При единичном же или мелкосерийном производстве (на уровне нескольких сотен микросхем одного типа в год) эти затраты становятся сравнимыми с суммарными затратами на проведение, с одной стороны, обработок, а с другой – всех остальных мероприятий по контролю качества изделий.

В настоящее время в отрасли существует лишь один нормативный документ [2] (да и то распространяющийся только на продукцию специального назначения), задачей которого было установление единых правил обеспечения и контроля качества электрорадиоизделий в условиях малых объемов выпуска, позволяющих снизить затраты на проведение периодических испытаний. В стратегии построения этого документа имеется ряд особенностей, вызванных желанием авторов установить универсальные правила для всех электрорадиоизделий, без учета их функционального, конструктивного и технологического своеобразия, что в значительной степени снижает возможность корректного использования установленных им правил, в том числе, правил проведения периодических испытаний (хотя и сами эти правила не вполне адекватны для применения в условиях мелкосерийного производства высокосложных микросхем):

- понятия единичного и мелкосерийного, прерывистого и непрерывного производства отнесены стандартом к отдельным изделиям, а не к деятельности изготовителя, в целом;
- задачей внешних воздействий при испытаниях остается всего-навсего имитация или воспроизведение внешних факторов, воздействующих на изделие при эксплуатации, но никоим образом не провоцирование развития дефектов изделий (в первую очередь, скрытых) в регистрируемый отказ (таким образом, стандарт оперирует понятиями «механических, климатических и конструктивных испытаний», а не понятиями «дефект чего-либо», «группа дефектов чего-либо» (например, «дефекты кристалла»), «отказ чего-либо» и др.);

дополнительные требования по обеспечению и контролю качества изделий, призванные компенсировать снижение объемов проведения периодических испытаний, являются рутинными требованиями к организации производственного процесса, однако, никоим образом не могут рассматриваться в качестве технического обоснования такого снижения;

снижение объемов периодических испытаний стандарт предлагает обеспечивать двумя путями:

а) совмещением нескольких подгрупп испытаний в одну, проводимую на одной выборке;

б) увеличением периодичности испытаний.

Совмещение нескольких подгрупп испытаний в одну подгруппу, действительно, позволяет снизить количество изделий, уничтожаемых в процессе проведения испытаний, и может быть признано корректным, если получение отрицательного результата испытаний крайне маловероятно. Однако, чем большее количество последовательностей испытаний включено в одну подгруппу, тем меньше шансов достоверно идентифицировать условия и, следовательно, причины отказов

при отрицательном результате (а это, в свою очередь, не позволяет разрабатывать адекватные корректирующие и предупреждающие мероприятия в производственном процессе).

Увеличение же периодичности испытаний, предназначенных, в первую очередь, для интегральной оценки неизменности качества изделий (то есть, фактически, стабильности производственного процесса), в условиях динамично развивающихся микроэлектронных технологий, не может иметь никаких технических оснований, поскольку даже квартальная периодичность недостаточна для такой оценки и оправданна только с точки зрения невозможности значимого сокращения длительности технологического цикла изготовления и самих испытаний. Иными словами, периодическое испытание микросхем, проводимые с полугодичной или годичной периодичностью, можно исключать из производственного процесса без какого-либо ущерба для достоверности оценки стабильности качества выпускаемой продукции.

С другой стороны, нормативными документами допускается кардинальное сокращение объемов периодических испытаний изделий специального назначения за счет применения принципов конструктивно-технологического подобия, трактуемого, как «совокупность конструктивных и (или) технологических признаков изделий, позволяющих объединить их в одну конструктивно-технологическую группу для проведения испытаний по определенной группе (подгруппе) испытаний» [3].

При этом, понятие «конструктивно-технологическая группа изделий» трактуется, как «совокупность типов (типономиналов, типоразмеров) изделий, объединенных по конструктивному и (или) технологическому признакам, определяющим особенности конструкции или изготовления этой группы изделий».

Строго говоря, аналогичное правило упомянуто и в стандарте на изделия мелкосерийного и единичного производства [2], однако, этот нормативный документ, ориентируясь на универсальные подходы, вынужден оперировать чрезвычайно расплывчатыми понятиями, например, «большинство технологических операций», «однотипная конструкция», «изделия, … близкие по технологии изготовления и применяемым материалам» и др., что не позволяет использовать его в практической деятельности. Тем не менее, нормативными документами, в принципе, допускается объединение микросхем в одну конструктивно-технологическую группу для проведения периодических испытаний, что позволяет существенно сократить объемы испытаний и, соответственно, затраты на них, путем распространения результатов испытаний изделий одного типа на все изделия, входящие в конструктивно-технологическую группу.

Однако, правила объединения микросхем в конструктивно-технологические группы, установленные, в развитие требований государственных стандартов, отраслевыми нормативными документами, не вполне корректны технически (зачастую, противоречат друг другу) и явно отстают от производственных реалий сегодняшнего дня.

Во-первых, конструктивно-технологическая группа, в которую включена микросхема конкретного типа, должна быть указана в технических условиях на нее. Иными словами, микросхемы каждого типа могут входить только в одну конструктивно-технологическую группу. Таким образом, все типы микросхем одной конструктивно-технологической группы должны быть признаны подобными для всех подгрупп периодических испытаний, на которых допускается распространение результатов испытаний, для тех же подгрупп испытаний, где такое распространение противоречит технической логике и здравому смыслу, отнесение отдельных типов микросхем к другим конструктивно-технологическим группам не допускается.

Во-вторых, конструктивно-технологическая группа может быть организована либо по признаку принадлежности к одной группе типов (тогда распространению подлежат результаты испытаний, направленных, как принято считать, на контроль качества кристалла микросхемы – согласно отраслевому стандарту на микросхемы специального назначения – испытаний подгрупп C1, C2, C6, D4 (кроме испытаний на воздействие механических нагрузок), либо по признаку подобия корпуса и методов монтажа кристалла (тогда распространению подлежат результаты испытаний по подгруппам C3, C4, C5, D1, D2, D3, D4 (в части испытаний на воздействие механических нагрузок). Иными словами, отраслевой нормативной документацией, в отличие от требований государственных стандартов, не предусмотрена возможность установления конкретных конструктивно-технологических групп для каждой подгруппы периодических испытаний, применительно к ее назначению и конкретному составу.

В третьих, сами правила распространения результатов испытаний, в ряде случаев, не вполне технически корректны. Так, объединение в конструктивно-технологическую группу по признаку принадлежности к одной группе типов не может не вызвать серьезных сомнений.

Согласно стандарту терминов и определений на микросхемы [4], группа типов – это «совокупность типов интегральных микросхем в пределах одной серии, имеющих аналогичное функциональное назначение и принцип действия, свойства которых описываются одинаковыми или близкими по составу электрическими параметрами», то есть этот признак не содержит ни одной конструктивной или технологической особенности. Так, например, микропроцессоры 1890ВМ1Т и 1890ВМ2Т обладают всеми признаками, позволяющими включить их в одну группу типов. Тем не менее, распространение результатов испытаний, например, по подгруппе C2 (кратковременные испытания на безотказность) для микросхем, разработанных с применением различных правил проектирования и различных библиотек стандартных элементов и изготовленных в различных базовых технологических процессах (КМДП 0,5 мкм и КМДП 0,35 мкм), технически некорректно. С другой стороны, микросхемы 1899ВМ1Т и 1899ВГ2Т микропроцессор и микроконтроллер одной степени интеграции, разработанные с использованием одних правил проектирования и библиотек стандартных элементов, изготовленные в одном базовом технологическом процессе, с использо-

ванием одних и тех же материалов, одного и того же технологического оборудования, тем же персоналом, в один и тот же период времени, как объекты оценки стабильности производственного процесса неразличимы, хотя и имеют различное функциональное назначение и не могут быть отнесены к одной группе типов.

С другой стороны, принципы, заложенные в основу формирования конструктивно-технологических групп по признаку подобия корпуса и методов монтажа кристалла, в одних случаях недостаточны, а в других – избыточны.

Так, понятие «тип корпуса» включает только конфигурацию тела корпуса и взаимное по отношению к нему расположение внешних выводов [5]. Внешние выводы в пределах одного типа корпуса могут иметь различную форму, независимо от их количества (для корпусов типа 4 – неформованные, формованные вида «gull-wing», формованные вида «J», контактные площадки; для корпусов типа 6 – штырьковые, для корпусов типа 8 – шариковые), а также различный основной материал и материалы покрытий. Метод монтажа кристалла на клей может предусматривать использование изолирующего или электропроводного клеев, при этом можно получить различные результаты ряда испытаний для микросхем с различными размерами кристаллов. Серьезное влияние на результаты некоторых последовательностей испытаний оказывает сам технологический процесс сборки (например, метод, материал и режимы монтажа внутренних межсоединений, состав внешней среды при герметизации и его подконтрольность). Очень важен субъект изготовителя корпуса (результаты испытаний микросхем в корпусе из белой керамики могут кардинально отличаться от результатов, полученных для микросхем в корпусе из темной керамики).

С другой стороны, совпадение столь многочисленных признаков, допускающее рассматривать различные микросхемы, как «одинаковые» по отношению к процессу сборки, для отдельных последовательностей испытаний явно избыточно. Так, например, для распространения результатов испытаний последовательности D2 (испытание на воздействие повышенной влажности воздуха) достаточно критерия совпадения типоразмера и изготовителя корпуса.

Таким образом, принятый в отраслевых документах упрощенный подход к реализации принципов конструктивно-технологического подобия, несмотря на кажущуюся простоту, приводит, для ряда подгрупп, к неоправданному сохранению объема периодических испытаний, а для других подгрупп – может привести к неоправданному распространению положительных результатов испытаний на несоответствующую продукцию.

Для повышения достоверности оценки стабильности производственного процесса изготовления микросхем, в том числе стабильности качества продукции, и оценки возможности продолжения ее выпуска необходимо уточнить и конкретизировать требования государственных стандартов применительно, в том числе, к производству сложных микросхем современных конструктивно-технологических поколений, выпускаемых малыми объемами.

Для единого понимания и реализации подходов к контролю качества сложных микросхем современных конструктивно-технологических поколений, выпускаемых малыми объемами, следует оговорить несколько ключевых положений, которые, вероятно, в дальнейшем необходимо закрепить в соответствующих нормативных документах:

- понятие «конструктивно-технологическое подобие изделий» следует, (по меньшей мере, по отношению к микросхемам), относить только к подгруппам испытаний (иными словами, в общем случае, каждой подгруппе испытаний должна быть приписана своя конструктивно-технологическая группа микросхем; это определение не препятствует приписыванию конструктивно-технологической группы одного и того же состава нескольким подгруппам испытаний);

- подгруппа испытаний предназначена для провоцирования развития в регистрируемый отказ тех дефектов изделий (в первую очередь, скрытых), которые характерны для производственных, конструктивных и (или) технологических особенностей, использованных для объединения микросхем в одну конструктивно-технологическую группу; таким образом, и последовательности испытаний, входящих в подгруппу, и признаки, объединяющие микросхемы в одну конструктивно-технологическую группу, должны быть ориентированы на «выбивание» из испытательной выборки тех изделий, которые содержат заранее известную номенклатуру дефектов (групп дефектов);

- при широком использовании признаков конструктивно-технологического подобия понятия единичного и мелкосерийного, прерывистого и непрерывного производства следует относить не к отдельным изделиям, а к деятельности производственного участка, производственной линии или предприятия, в целом;

- понятие «группа типов», которое не предусматривает, в общем случае, ни технологического, ни конструктивного подобия изделий, должно быть исключено из правил формирования конструктивно-технологических групп;

- понятие «серия» (совокупность типов интегральных микросхем, обладающих конструктивной, электрической и, при необходимости, информационной и программной совместимостью и предназначенных для совместного применения [4]) также не должно служить ограничением для формирования конструктивно-технологических групп, поскольку в определении этого понятия говорится лишь о совместимости входящих в нее микросхем, а не об их конструктивно-технологическом подобии;

- при формировании конструктивно-технологических групп следует, в общем случае, руководствоваться, в зависимости от целей конкретной подгруппы испытаний, признаками не только конструктивно-технологического, но и производственного подобия.

В общий перечень признаков конструктивного подобия микросхем (используемый при выборе совокупности признаков в зависимости от назначения и состава конкретной подгруппы испытаний) следует включить:

- использование при разработке одних и тех же правил проектирования [6];

- близкое количество активных элементов на кристалле (степень интеграции [4]);

- близкий уровень стойкости к воздействию разряда статического электричества (в пределах уровня чувствительности 2000 В или выше этого уровня);

- использование корпуса одной конструкции (в том числе, одинаковые подтип [5] и материал корпуса, количество внешних выводов, изготовитель корпуса и технологический процесс его изготовления);

- использование одних и тех же конструкционных материалов (клея для монтажа кристалла, проволоки для межсоединений, и др.).

Соответственно, в общий перечень признаков технологического подобия микросхем (также используемый при выборе совокупности признаков применительно к конкретной подгруппе испытаний) следует включить:

- обработку в рамках одного и того же базового процесса кристального производства [6];

- использование одних и тех же материалов и технологических сред;

- единые параметры, условия и режимы проведения сборочных операций;

- единые показатели стабильности технологического процесса [7].

Наконец, признаки производственного подобия должны, в общем случае, включать:

- место изготовления – одно предприятие-изготовитель, одно и то же технологическое оборудование (технологическая линия, технологический комплекс), один и тот же производственный персонал;

- время изготовления – один и тот же период, на который распространяют результаты периодических испытаний.

Для корректного выбора признаков конструктивно-технологического подобия для конкретных подгрупп периодических испытаний следует зафиксировать задачи каждой из стандартных подгрупп периодических испытаний [8]:

- подгруппа С 1 (проверка внешнего вида и электрических характеристик) – подтверждение исходного соответствия микросхем испытательной выборки требованиям к параметрам – критериям годности, подлежащим проверке по окончании периодических испытаний;

- подгруппа С 2 (кратковременное испытание на безотказность) – подтверждение устойчивости характеристик элементов кристалла к деградационным процессам, протекающим под влиянием длительного воздействия температуры и электрической нагрузки, и отсутствия дефектов, снижающих эту устойчивость (характерные отказы – несоответствие электрических параметров микросхемы, отсутствие функционирования);

- подгруппа С 3 (последовательное воздействие знакопеременных тепловых и механических нагрузок) – подтверждение устойчивости характеристик конструкционных элементов микросхемы и их соединений (основания и крышки корпуса, проволочных межсоединений, монтажного соединения кристалла), к знакопеременным тепловым и механическим нагрузкам, и отсутствия дефектов, снижающих эту устойчивость (характерные отказы – негерметичность корпуса, разрушение основания корпуса, обрыв внешних выводов, обрыв или короткое замыкание проволочных межсоединений, отрыв кристалла от основания корпуса, разрушение кристалла);

- подгруппа С 4 (последовательное воздействие различных механических нагрузок) – подтверждение устойчивости характеристик конструкционных элементов микросхемы и их соединений (основания и крышки корпуса, проволочных межсоединений, монтажного соединения кристалла), к механическим нагрузкам, и отсутствия дефектов, снижающих эту устойчивость (характерные отказы – негерметичность корпуса, разрушение основания корпуса, обрыв внешних выводов, обрыв или короткое замыкание проволочных межсоединений, отрыв кристалла от основания корпуса, разрушение кристалла);

- подгруппа С 5 (последовательное воздействие внешних факторов на внешние выводы микросхемы) – подтверждение устойчивости внешних выводов корпуса микросхемы к механическим нагрузкам, а также конструкционных элементов микросхемы и их соединений (основания и крышки корпуса, проволочных межсоединений, монтажного соединения кристалла) к кратковременному воздействию высокой температуры, и отсутствия дефектов, снижающих эту устойчивость (характерные отказы – отрыв, нарушение целостности внешних выводов);

- подгруппа С 6 – подтверждение устойчивости элементов входа/выхода кристалла микросхемы к воздействию разряда статического электричества и отсутствия дефектов, снижающих эту устойчивость (характерные отказы – пробои и пережоги, отсутствие функционирования);

- подгруппа D 1 – подтверждение устойчивости упакованных микросхем и элементов упаковки к механическим нагрузкам и отсутствия дефектов упаковки, снижающих эту устойчивость (характерные отказы – нарушение целостности упаковки, смещение микросхем внутри упаковки, деформация внешних выводов и (или) разрушение микросхем);

- подгруппа D 2 (испытание на воздействие повышенной влажности воздуха) – подтверждение устойчивости металлических элементов и покрытий корпуса микросхемы к коррозионным эффектам, а диэлектрических поверхностей – к эффектам образования проводящих цепей, в условиях воздействия повышенной влажности и электрического потенциала, и отсутствия дефектов, снижающих эту устойчивость (характерные отказы – коррозионное разрушение металлических покрытий и основного материала металлических деталей корпуса, образование проводящих цепей на поверхности диэлектрических элементов);

- подгруппа D 3 – подтверждение отсутствия в подкорпусном объеме корпуса уровня влажности, потенциально опасного с точки зрения провоцирования деградационных процессов на кристалле, в первую очередь, коррозии металлизации (характерный отказ – превышение полученным результатом уровня влажности, установленного в ОТУ – 5000 ppm);

- подгруппа D 4, последовательность 1 – подтверждение сохранения тепловых характеристик микросхемы на заданном уровне (характерный отказ – пре-

вышение полученным результатом значения теплового сопротивления, установленного в ТУ);

- подгруппа D 4, последовательность 2, вид испытания 1 (граничное испытание на воздействие одиночных ударов) – подтверждение сохранения уровня конструктивно-технологических запасов устойчивости характеристик конструкционных элементов микросхемы и их соединений к воздействию механических нагрузок (характерные отказы – негерметичность корпуса, разрушение основания корпуса, обрыв внешних выводов, обрыв или короткое замыкание проволочных межсоединений, отрыв кристалла от основания корпуса, разрушение кристалла)

- подгруппа D 4, последовательность 2, вид испытания 2 (кратковременное испытание на безотказность) – подтверждение сохранения уровня конструктивно-технологических запасов устойчивости кристаллов микросхем к деградационным процессам, протекающим под влиянием длительного воздействия температуры и электрической нагрузки, и отсутствия дефектов, снижающих эту устойчивость (характерные отказы – несоответствие электрических параметров микросхемы, отсутствие функционирования);

- подгруппа D 5 – обобщение результатов проверки устойчивости характеристик элементов кристалла к деградационным процессам, протекающим под влиянием длительного воздействия температуры и электрической нагрузки;

- подгруппа D 6 (испытание на пригодность к пайке после длительного хранения) – подтверждение сохранения качества припойного покрытия внешних выводов при длительном хранении (характерные отказы – большая площадь окисленных областей припойного покрытия, не смачиваемых испытательным припоем).

Исходя из принятых выше правил и допущений (перечней конструктивного, технологического и производственного подобия и целей проведения отдельных подгрупп периодических испытаний) можно сформулировать признаки подобия, определяющих состав конструктивно-технологических групп для каждой подгруппы испытаний.

В первую очередь, при проведении периодических испытаний следует использовать вполне понятные, в нынешних условиях, признаки «одинаковости» кристаллов микросхем по отношению к тем испытаниям, которые нацелены на выявление «слабых» мест в технологическом (даже более широко – производственном) процессе обработки пластин. Это – одинаковые конструктивные решения элементов кристалла и сравнимое количество этих элементов, одинаковые последовательность, параметры, условия и режимы проведения технологических операций, а также одна система операционного контроля, имеющая единые критерии оценки качества и опирающаяся, в том числе, на единый параметрический монитор. В виде системы требований такие признаки «одинаковости» для соответствующих подгрупп периодических испытаний можно сформулировать следующим образом:

«Микросхемы, входящие в одну конструктивно-технологическую группу, должны:

- иметь одну и ту же степень интеграции,

- быть спроектированы с использованием одних и тех же правил проектирования [6],

- быть изготовленными одним и тем же изготовителем, одними и теми же средствами технологического оснащения в одном базовом технологическом процессе [6]».

Конструктивно-технологические группы с такими признаками можно использовать для подгрупп испытаний C2 и D4 (последовательность 2, вид испытаний 2). Равным образом, при формировании конструктивно-технологической группы для подгруппы D5 (расчет интенсивности отказов на основе результатов испытаний по подгруппе C2) логично использовать этот же уровень обобщения, а не ограничиваться расчетом λис в пределах серии микросхем.

Аналогичный подход к формированию конструктивно-технологической группы для подгруппы C6 может быть применен с некоторым уточнением: поскольку стойкость к воздействию разряда статического электричества не зависит от степени интеграции, а определяется конструктивными решениями кристалла (а именно, защитными схемами, использованными во входных и выходных цепях микросхемы) и качеством изготовления этих защитных схем в составе кристалла:

«Микросхемы, входящие в одну конструктивно-технологическую группу, должны:

- иметь один и тот же уровень стойкости к воздействию разряда статического электричества, зафиксированный при проведении квалификационных испытаний,

- быть спроектированы с использованием одних и тех же правил проектирования,

- быть изготовленными одним и тем же изготовителем, одними и теми же средствами технологического оснащения в одном базовом технологическом процессе».

Для испытаний же, имеющих своей задачей «расшатывание» конструкции микросхемы, рассматриваемой в качестве сборочной единицы, признаки «одинаковости» микросхем для соответствующих подгрупп периодических испытаний можно, в общем случае, изложить следующим образом:

«Микросхемы, входящие в одну конструктивно-технологическую группу, должны:

- иметь корпус одного и того же подтипа по ГОСТ 17021, изготовленный одним и тем же изготовителем, одними и теми же средствами технологического оснащения с использованием одних и тех же конструктивных материалов и с применением одних и тех же конструктивно-технологических решений,

- иметь одно и то же количество, шаг и покрытие внешних выводов,

- пройти сборочные операции на одном и том же предприятии, с использованием одних и тех же средств технологического оснащения и конструкционных материалов, с применением одних и тех же конструктивно-технологических решений (в том числе, материалов и методов монтажа межсоединений и кристалла и одних и тех же методов герметизации)».

Такие конструктивно-технологические группы возможно использовать для подгрупп испытаний C3, C4 и D4 (последовательность 2, вид испытания 1).

Для подгрупп испытаний C5, D2 и D3, нацеленных исключительно на оценку устойчивости наружных элементов микросхем к внешним воздействиям, поня-

тие конструктивно-технологической группы можно расширить:

«Микросхемы, входящие в одну конструктивно-технологическую группу, должны:

- иметь корпус одного и того же подтипа по ГОСТ 54844, изготовленный одним и тем же изготовителем, одними и теми же средствами технологического оснащения с использованием одних и тех же конструктивных материалов и с применением одних и тех же конструктивно-технологических решений,
- иметь одно и то же количество и шаг внешних выводов,
- иметь одно и то же покрытие металлических элементов корпуса».

Для подгруппы испытаний D6, нацеленной исключительно на оценку качества припойного покрытия внешних выводов корпусов микросхем, понятие конструктивно-технологической группы можно сформулировать несколько иначе:

«Микросхемы, входящие в одну конструктивно-технологическую группу, должны:

- иметь корпус одного и того же подтипа по ГОСТ 17021, изготовленный одним и тем же изготовителем, одними и теми же средствами технологического оснащения с использованием одних и тех же конструктивных материалов и с применением одних и тех же конструктивно-технологических решений,
- иметь одни и те же шаг и припойное покрытие внешних выводов (в том числе состав, толщину и метод нанесения припойного покрытия)».

Для подгруппы испытаний D1, нацеленной исключительно на оценку отсутствия возможности деформации микросхем в упаковке, понятие конструктивно-технологической группы можно сформулировать наиболее широко:

«Микросхемы, входящие в одну конструктивно-технологическую группу, должны быть изготовлены в корпусе одного типа с одинаковыми габаритными и присоединительными размерами».

При периодических же испытаниях по подгруппе D4, последовательность 1 (подтверждение теплового сопротивления) их результаты недопустимо рассматривать, как инвариантные:

- ни по отношению к кристаллу (нарушение технологического процесса обработки пластин может привести к изменению температуры кристалла),
- ни по отношению к микросхеме, рассматриваемой в качестве сборочной единицы (нарушение технологического процесса монтажа кристалла может привести к изменению теплопроводности монтажного соединения).

Что касается подгруппы испытаний C1, то этим испытаниям следует подвергать выборки микросхем тех типов, которые назначены (на основе изложенных выше признаков конструктивно-технологического подобия) для проведения испытаний по подгруппам C2 – C6 и D1 – D6.

Самые грубые расчеты позволяют утверждать, что внедрение предложенного подхода к организации периодических испытаний на технологическом комплексе НИИСИ РАН (при условии, что испытанию по каждой подгруппе подвергают одного представителя конструктивно-технологической группы) позволит снизить затраты на проведение этих испытаний не менее чем в два раза, при сохранении достоверности проводимых оценок.

.

Issues of VLSI technology conformance inspection tests in short-run environment

E.S. Temnikov

Abstract. Industrial and technical problems of realization of periodic tests high sophisticated microcircuits in conditions of individual and small-scale manufacture are considered. The new approach to realization of principles of constructive and technological similarity is offered by the address approach to separate subgroups of the tests, allowing sharply to reduce volumes of tests at preservation of reliability of estimations of stability of production.

Keywords: chip, control test, a reliable estimate of stability

Литература

1 ГОСТ 16504-81 «Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Термины и определения».

2 ГОСТ РВ 20.57.418-98 «Комплексная система контроля качества... Обеспечение, контроль качества и правила приемки изделий мелкосерийного и единичного производства в условиях неритмичного и прерывистого изготовления».

3 ГОСТ РВ 20.57.413-97 «Комплексная система контроля качества... Контроль качества готовых изделий и правила приемки».

4 ГОСТ 17021-88 «Микросхемы интегральные. Термины и определения».

5 ГОСТ 54844-2011 «Микросхемы интегральные. Основные размеры».

6 А.В. Аникин, С.В. Демин, А.А. Столяров Проблемы разработки и реализации базовых технологических процессов на технологическом комплексе НИИСИ РАН, «Труды НИИСИ РАН», 2013 г., №2: «Оптоэлектронные системы» (в этом выпуске).

7 Т.М. Антонова, Е.С. Темников Реализация основных принципов контроля стабильности базовых технологических процессов в условиях мелкосерийного производства, «Труды НИИСИ РАН», 2013 г., №1: «Технология и производство субмикронных СБИС»

8 ОСТ В 11 0998-99 «Микросхемы интегральные. Общие технические условия».

Обеспечение одновременного выполнения НИОКР и выпуска СБИС на технологическом комплексе НИИСИ РАН

Н.Н. Калинина, В.Н. Балакирев

Аннотация: Рассматривается задача организации изготовления СБИС на технологическом комплексе НИИСИ РАН в условиях одновременного выполнения НИОКР и производства изделий, законченных разработкой. Описаны организационно-технические подходы, позволяющие обеспечить выполнение поставленной задачи в текущих условиях производства.

Ключевые слова: НИОКР, производство СБИС, управление производственным процессом, планирование, система обращения документации, оптимизация

Введение

Компактный технологический комплекс НИИСИ РАН начал изготовление микросхем в 2003 г., когда состоялась официальная приемка первой очереди технологического комплекса для изготовления малых партий СБИС. Приемка сопровождалась демонстрацией пластин с опытными образцами СБИС 32-разрядного микропроцессора с RISC-архитектурой, функционального аналога R3081, спроектированной НИИСИ РАН на основе лицензии ф. MIPS. Обеспечив успешное изготовление микросхемы в базовом технологическом процессе по КМОП технологии с проектными нормами 0,5 мкм и тремя уровнями металлизации, технологический комплекс НИИСИ РАН стал первым субмикронным микроэлектронным производством в России, оставаясь единственным в течение почти 10 лет [1]. В 2007 г. технологический комплекс был дооснащен оборудованием сборочно-испытательного цикла.

С этого времени НИИСИ РАН постоянно выполняет проекты по разработке и постановке на производство СБИС собственной разработки при непрерывном повышении уровня технологии. В настоящий момент номенклатура СБИС, законченных разработкой в НИИСИ РАН, включает более 25 высокосложных микросхем, среди которых микропроцессоры с RISC архитектурой, процессоры цифровой обработки сигналов, системные контроллеры, мультиконтроллеры, графические контроллеры, контроллер и коммутатор Ethernet, системы на кристалле и другие СБИС.

Большая часть СБИС (15 типов), освоенных в производстве, проходит полный производственный цикл от изготовления пластин в одном из восьми базовых технологических процессов НИИСИ РАН до сборки и испытаний. Самые сложные из этих микросхем содержат 3,4 млн. элементов на кристалле (микропроцессор с архитектурой RISC для обработки 64 разрядных чисел с фиксированной и плавающей запятой) и 6,2 млн. элементов (микросхема статического ОЗУ).

При изготовлении части СБИС, завершенных разработкой (9 типов), в цепочке поставки используется внешняя кооперация: изготовление пластин проводится на сторонних предприятиях в режиме аутсорсинга, сборка микросхем и отбраковочные испытания – на технологическом комплексе НИИСИ РАН либо сборка также проводится на стороннем предприятии, а испытания – на технологическом комплексе НИИСИ РАН.

С конца 2003 г. НИИСИ РАН начал выполнять заказы в режиме «кремниевой мастерской» на разработку и изготовление пластин с кристаллами заказанных элементов – заказных микросхем, разработанных сторонними разработчиками для комплектования ими своей радиоэлектронной аппаратуры.

Помимо выпуска СБИС и пластин с кристаллами заказанных элементов на технологическом комплексе НИИСИ РАН изготавливаются макеты и опытные образцы в рамках заказов на выполнение НИОКР и для исследований, проводимых в инициативном порядке.

Так, в 2012 году было выполнено изготовление пластин для 3 ОКР по разработке СБИС, для 2 ОКР по разработке новых технологий по проектным нормам 0,25 мкм, а также ОКР по разработке библиотеки элементов для проектирования СБИС, изготавливаемых по этой технологии. Кроме того, для внешних заказчиков НИИСИ РАН выполняло 15 НИОКР по разработке и изготовлению пластин с кристаллами заказанных элементов.

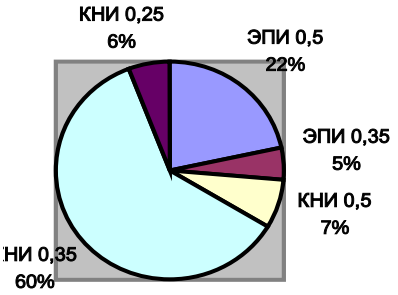
В целом, на участке кристального производства НИИСИ РАН ежегодно ведется обработка пластин с кристаллами не менее 25 типов изделий, как находящихся в процессе разработки, так и завершенных разработкой. Доля пластин, изготавливаемых для поставок микросхем и пластин с кристаллами заказанных элементов, завершенных разработкой, составляет примерно 30% от всех продуктивных пластин. Так, в 2012 г. прошли обработку 212 пластин с изделиями, из которых:

– 67 пластин СБИС, завершенных разработкой (10 пластин с кристаллами СБИС разработки НИИСИ РАН и 57 пластин с кристаллами заказанных элементов для поставок сторонним заказчикам);

– 145 пластин с макетами и опытными образцами изделий, обработанных в рамках выполнения НИОКР.

При этом следует учесть, что в 2012 году обработка пластин с кристаллами СБИС, завершенных разработкой, проводилась в пяти из восьми базовых технологических процессов изготовления СБИС на пластине, поддерживаемых на технологическом комплексе НИИСИ РАН. В 2012 г. изготовление изделий по тех-

нологическому процессу 0,35 мкм КНИ составляло 60% объема обработанных пластин (рис. 1).



Рисинок 1. Относительная доля пластин, проходивщих обработку в различных в базовых технологических процессах в 2012 г.

В 2013 году сократилась потребность в применении технологического процесса 0,5 мкм КНИ и значительно возросла востребованность технологического процесса 0,25 мкм КНИ (рис. 2). Можно ожидать, что спрос на обработку пластин по 4-5 базовым технологиям в ближайшее время сохранится. Это говорит о необходимости частой переналадки оборудования в связи с необходимостью перестройки режимов технологических операций.

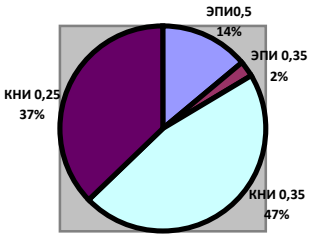


Рисунок 2. Относительная доля пластин, проходивщих обработку в различных в базовых технологических процессах в 2013 г.

В описанных условиях организация одновременного выполнения НИОКР и обеспечения поставок СБИС, законченных разработкой, требует решения двух трудно совместимых задач:

– обеспечение обработки пластин с кристаллами изделий, разработка которых завершена, исключающее любые отклонения от требований нормативных документов (КД, ТД и стандартов) с одновременным изготовлением моделей, макетов и опытных образцов, а также проведением исследовательских работ в области технологии, предусматривающим возможность отклонения от требований базовых технологических процессов и стандартных конструктивно-технологических решений;

– обеспечение выполнения планов-графиков НИОКР и договорных обязательств по поставкам в условиях короткого цикла изготовления широкой номенклатуры изделий небольшими партиями и связанная с этим необходимость постоянной переналадки оборудования.

Организационно-технические подходы к решению этих двух задач разрабатывались поэтапно и привели к созданию системы двухуровневого планирования, т.е. планирования НИОКР и планирования производственного процесса, а также к созданию системы обращения технологической и сопроводительной документации.

1. Основные организационно-технические подходы

Для обеспечения одновременной обработки пластин с кристаллами изделий, разработка которых завершена, и пластин с макетами и опытными образцами разрабатываемых изделий на технологическом комплексе НИИСИ РАН, необходимо выполнение следующих организационно-технических принципов:

– группирование выполняемых работ по признакам однородности (по технологическим процессам, по конструкции – по типу корпуса, по потребителям – по срокам отгрузки и др.);

– установление приоритетности выполнения работ;

– организация взаимоувязанного планирования НИОКР и поставок с планированием загрузки технологического комплекса;

– обеспечение оперативного контроля выполнения планов, своевременная их корректировка с доведением информации об обновлениях до исполнителей;

– предельная формализация всех документов (протоколов, справок, отчетов, заключений, сопроводительных документов), выполняемых в процессе проведения НИОКР, а также при изготовлении, контроле качества, хранении и поставке изделий, завершенных разработкой;

– максимальное использование принципов конструктивной и технологической преемственности при разработке конструкторской и технологической документации [2];

– соблюдение порядка разработки и использования технологической и сопроводительной документации (разграничение ответственности, разграничение прав доступа).

2. От укрупненного планирования к диспетчеризации производственного процесса

При организации производственного процесса на технологическом комплексе НИИСИ РАН потребовалось связать в единую систему укрупненное планирование работ, выполняемых по договорам – от формирования заказа и заканчивая отгрузкой готовой продукции, и организацию процесса производства на технологическом комплексе.

Увязка планирования НИОКР и поставок с графиком загрузки технологического комплекса особенно сложна в силу неравномерного прерывистого характера потребности в изготовлении образцов, характерного для мелкосерийного производства, в отличие от массового, когда одно изделие обрабатывают в больших количествах в течение длительного времени.

Эта система двухуровневого планирования должна обеспечить оперативное получение объективной и подробной информации об актуальной ситуации и создать условия для принятия руководством своевременных и обоснованных управленческих решений.

При планировании НИОКР и обработок пластин с изделиями, завершенными разработкой, формируется годовой план работ, предусмотренных совокупностью всех выполняемых договоров, в соответствии с ведомостями исполнения договоров. По результатам планирования на этом уровне затем составляется объемно-календарный план обработки пластин с изделиями различного статуса (моделей, макетов, опытных образцов и изделий, завершенных разработкой).

Цель оптимизации на уровне планирования НИОКР и обработок уже разработанных изделий состоит в выполнении сроков работ по планам-графикам НИОКР и контрактам на поставки. Нарушение сроков работ может иметь различные причины:

– непредвиденное увеличение объемов работ при выполнении исследовательских этапов НИОКР и, как следствие, задержки со сроками завершения разработки конструкторской и технологической документации и ее поступления в архив;

– нарушение сроков разработки и изготовления оснастки (например, фотошаблонов или пробкарт);

– нарушение сроков разработки исследовательских программ и программ тестирования;

– нарушение сроков изготовления макетов и образцов изделий;

– нарушение сроков работ исполнителями составных частей ОКР.

Целевой функцией при оптимизации планирования работы технологического комплекса является выполнение ранее утвержденного объемно-календарного плана обработки изделий.

Составляется подробный оперативный план загрузки технологического комплекса на ближайшую перспективу. Оперативный план детализирует объемный план по времени запуска и обработки партий изделий.

Обычно горизонт оперативного планирования не превышает двух-трех месяцев (квартала), более далекие сроки не имеют смысла в силу непрерывно меняющихся условий производства, требующих корректировки производственных расписаний.

Нарушение сроков выполнения объемно-календарного плана производства изделий помимо причин, перечисленных выше и не связанных с непосредственным изготовлением изделий, может быть обусловлено следующими причинами:

– необходимостью повторного изготовления изделия, вследствие допущенного брака;

– незапланированными простоями оборудования (ремонт, задержка с поставкой расходных материалов).

Для нормального функционирования предприятия, выпускающего высокотехнологичную продукцию, необходимы качественная инфраструктура (оборудование, сети и т.д.) и автоматизация планирования на всех уровнях, в максимальной степени исключающая влияние человеческого фактора.

Планирование НИОКР и работ по договорам со сторонними предприятиями, выполняемых НИИСИ РАН, осуществляется по методике управления проектами, разработанной в 2008 г. Под «проектом» подразумевается весь комплекс работ, выполняемых в соответствии с условиями договора. Методика управления проектами ориентирована на использование программного средства MS Project Server пакета прикладных программ Microsoft Office. Методика обеспечивает построение шаблонов сетевых графиков на основе информационных моделей, разработанных для всех типов выполняемых НИОКР.

Разработанные информационные модели включают в себя:

– описание состава и последовательности работ при выполнении НИОКР;

– описание взаимосвязи между различными работами в проекте;

– описание типов ресурсов, используемых при выполнении работ;

– описание связей между уровнями управления и исполнения;

– описание документационного обеспечения управления НИОКР, включая, типы используемых документов (организационно-распорядительные документы, государственные стандарты, стандарты предприятия и др.); их представление, способы хранения и обращения.

Описание состава и последовательности работ разработано на основе внутренних стандартов системы управления качеством НИИСИ РАН (стандарты по разработке интегральных микросхем и пластин с кристаллами заказанных элементов, по порядку разработки и испытаний научно-технической продукции, по порядку обращения научно-технической документации и т.д.). Наименования работ, выполняемых в рамках проектов, стандартизованы. Для каждой из работ проекта проведена оценка времени ее выполнения на основании принципов нормирования труда, исходя из опыта ранее выполненных проектов.

Формы документов, находящихся в обращении во время выполнения проекта – протоколов, справок, отчетов, заключений, актов и др., также регламентированы. Порядок выполнения работ в рамках НИОКР и взаимосвязи между различными работами соответствуют требованиям стандартов по разработке и производству изделий микроэлектроники.

В случае нарушения запланированных сроков выполнения работ, может быть проведена немедленная корректировка плана НИОКР с последующей корректировкой плана работ технологического комплекса.

Для планирования загрузки технологического комплекса НИИСИ РАН и прослеживания производственных партий разработаны автоматизированные системы управления кристальным производством Meter (2003 г.) и управления участком сборки Assembler (2007 г.). Это автоматизированные системы управления производственными процессами типа MES (Manufacturing Execution System), обеспечивающие управление производством в реальном времени [3, 4].

Одна из функций MES систем – оперативное и детальное планирование работы, основанное на приоритетах, атрибутах, характеристиках и свойствах конкретного вида продукции, позволяющее также детально и оптимально вычислять загрузку оборудования.

Эти системы дают возможность управления производственными процессами в реальном времени и контролируют выполнение работ в соответствии с планом. Одна из важнейших функций подобных систем – диспетчеризация производства, управление по-

током единиц продукции в виде партий. Диспетчерская информация представляется в той последовательности, в которой работа должна быть выполнена, и изменяется в реальном времени по мере возникновения событий на цеховом уровне. Отслеживаются все происходящие изменения и вносятся корректировки в производственный план. Системы управления производственными процессами Meter и Assembler позволяют планировать одновременное изготовление до 8-10 партий пластин.

Большое количество рабочих мест сотрудников технологических подразделений обеспечено доступом к актуальной информации систем Meter и Assembler о прохождении партий вплоть до результатов выполнения технологических операций. Эта возможность активно используется операторами, диспетчерами, технологами и разработчиками СБИС, а также руководителями подразделений, как инструмент исследований и средство планирования работ.

3. Организация работы с производственной сопроводительной документацией

При одновременном выполнении НИОКР и выпуске продукции, законченной разработкой, изготовление изделий, макетов и опытных образцов, проведение технологических экспериментов проводится по документации, имеющей различный статус. При этом вероятно возрастание количества ошибок цехового производственного персонала. Снижение количества ошибок может быть обеспечено соблюдением жесткой дисциплины в использовании сопроводительной документации. На производственных участках технологического комплекса используется система генерации электронных сопроводительных листов. Введено разграничение сопроводительных листов изготовления партий по следующему принципу:

- сопроводительные листы изделий;
- экспериментальные сопроводительные листы;
- сопроводительные листы аттестационных процессов;
- сопроводительные листы подготовки оборудования.

Сопроводительные листы изделий (СЛИ) используются для изделий, изготавливаемых в базовых технологических процессах. Обработка пластин по СЛИ проводится в сопровождении технологов-разработчиков технологических процессов. На участке кристального производства по сопроводительным листам изделий проходят обработку в базовых технологических процессах не только пластины с кристаллами ранее разработанных изделий, но также пластины с макетами и опытными образцами СБИС и пластины с кристаллами заказанных элементов. При обработке пластин с изделиями, завершенными разработкой, используются сопроводительные листы из архива базовых СЛИ без права внесения изменений. Для изготовления макетов и опытных образцов в базовых технологических процессах сопроводительные листы разрабатываются технологами производственных участков в соответствии с технологической и конструкторской документацией, прошедшей необходимые согласования и размещенной в электронном архиве документации НИИСИ РАН. Внесение изменений в сопроводительные листы этих изделий должно согласовываться с технологами-разработчиками технологических процессов.

Максимальное использование принципов конструктивно-технологического подобия, приводящее к достижению высоких показателей технологичности изделий, изготавливаемых в разработанных базовых технологических процессах (более 85% в кристальном производстве и более 60% в сборочном производстве), позволяет сократить время разработки сопроводительных листов изделий до одного рабочего дня [4].

По экспериментальным сопроводительным листам (ЭСЛ) выполняется обработка пластин при проведении исследовательских работ по разработке новых технологий, проводимых в рамках НИОКР или по программам экспериментов, осуществляемых в инициативном порядке. По ЭСЛ изготавливаются макеты и опытные образцы в технологических процессах, отличных от базовых, проводятся работы по анализу брака и другие работы. Эти сопроводительные листы разрабатываются технологами-разработчиками технологических процессов. Обработка пластин по экспериментальным сопроводительным листам проводится под контролем технологов-разработчиков.

Сопроводительные листы аттестационных процессов (СЛА) разрабатываются для проведения процедур настройки (переналадки) оборудования, необходимых для его приспосабливания к изменениям в процессе, типе продукции, конфигурации корпуса и т.д., а также для демонстрации работы оборудования в рамках заранее установленных технических требований. Сопроводительные листы аттестационных процессов разрабатываются технологами-разработчиками технологических процессов, если дело касается технологического оборудования и специалистами по измерениям и анализу брака в случае измерительного оборудования. При планировании загрузки технологического комплекса должно быть запланировано проведение всех аттестаций оборудования, связанных с переналадкой, необходимых при изготовлении большой номенклатуры изделий в разнообразных технологических процессах.

Сопроводительные листы подготовки оборудования (СЛП) используются при обработке пластин в целях обеспечения готовности оборудования к работе. СЛП разрабатываются технологами производственных участков. Большая часть сопроводительных листов этого типа строго регламентированы в соответствии с последовательностями операций, предписываемыми производителями оборудования. При планировании загрузки технологического комплекса должно быть запланировано проведение всех необходимых мероприятий по обслуживанию оборудования.

Установленная система обращения сопроводительной документации, а также четкое определение ролей специалистов различных технологических подразделений значительно уменьшило риск брака при одновременном изготовлении изделий, завершенных разработкой, и образцов изделий для НИОКР.

4. Резервы повышения эффективности планирования

На рисунке 3 приводится схема, представляющая шесть основных состояний оборудования в соответствии со стандартом SEMI E10-0600 [5].

Рисунок 3. Схема состояний оборудования.

Для более эффективного использования оборудования нужно стремиться к сокращению в первую очередь незапланированного времени простоя, связанного, как правило, с поломками оборудования и задержками в обеспечении расходными материалами. Нужно по возможности сокращать время запланированного простоя и время в состоянии ждущего режима и стремиться, чтобы времени нахождения оборудования в рабочем состоянии хватало для обработки запланированного объема пластин.

Анализ обработки пластин, изготовленных в 2012 г. на технологическом комплексе НИИСИ РАН, показал, что в отдельные периоды время, затраченное на обработку пластин при аттестациях и подготовке оборудования, может составлять до 50% суммарного времени, затраченного на обработку пластин и проведение исследований.

Уровень загруженности оборудования обработкой пластин, характерно низкий для мелкосерийного производства, усугубляется отсутствием резервирования на технологическом комплексе. Так как неравномерность загрузки оборудования, являющаяся отчасти следствием компактности конфигурации технологического комплекса, не может быть преодолена, резервы для повышения производительности следует искать в других направлениях.

Так, для проведения ряда технологических операций время простоя оборудования, предшествующее технологической операции, является существенным фактором, определяющим необходимость проведения дополнительных аттестаций и переналадок. Время, затрачиваемое на дополнительное обслуживание и проведение аттестаций оборудования входит в запланированное время простоя. Дополнительных переналадок может не потребоваться, если время простоя не превышает некоторой заданной величины. Поэтому производственный график должен быть по возможности непрерывным, а не «рваным».

Группирование по признакам конструктивно-технологического подобия (по технологическим процессам, по типу корпуса, по режимам испытаний) [2] также приводит к уменьшению времени, затрачиваемого на переналадки. Например, в 2013 г. большая часть пластин будет обрабатываться в технологических процессах КМОП КНИ 0,25 мкм (47%) и КМОП КНИ 0,35 мкм (37%). Исходя из этого, некоторые запуски партий можно планировать последовательно в «однородных» технологических условиях.

Уменьшение «непродуктивного» времени за счет использования приведенных выше мер может составить до 4-5%. А это время эквивалентное времени изготовления дополнительно до 4 партий пластин.

Заключение

Таким образом, всесторонний учет закономерностей, действующих при мелкосерийном производстве на предприятиях микроэлектроники, в сочетании с организацией планирования НИОКР и поставок по разработанной методике управления проектами, использованием возможностей планирования производства системами управления производственными процессами Meter и Assembler и применением разработанной системы обращения технологической и сопроводительной документа позволяет обеспечить одновременное выполнение НИОКР и обработки пластин с кристаллами ранее разработанных изделий на технологическом комплексе НИИСИ РАН.

Таким образом, организация планирования производственного процесса по разработанной методике Управления проектами, использование возможностей планирования производства системами управления производственными процессами Meter и Assembler и применение разработанной системы обращения технологической и сопроводительной документа позволяют учесть закономерности мелкосерийного производства СБИС и одновременно обеспечить обработку изделий различного производственного статуса на технологическом комплексе НИИСИ РАН.

Simultaneous R&D execution and VLSI production garanteeing on the basis of SRISA semiconductor manufacturing line of Russian Academy of Sciences

N. N. Kalinina, V.N. Balakirev

Abstract. In the article the organizational and technical approaches are considered, allowing to organize simultaneous research and development performance and small scale wide nomenclature VLSI manufacturing on the basis of SRISA semiconductor manufacturing line. Implemented in SRISA a technique of R&D planning and VLSI production supply as well as wafer processing and assembly MES systems of in-house design application allow to solve problems of optimum work load of the SRISA manufacturing line.

Keywords: R&D, VLSI, manufacturing planning, optimization, MES systems

Литература

1. Е.П. Велихов, К.А. Валиев, В.Б. Бетелин 0,35-мкм КМОП-процесс в России – в 2004 году // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, №.3, 2004 г.
2. Е.С. Темников Проблемы проведения контрольных испытаний высокосложных микросхем в условиях мелкосерийного производства // «Труды НИИСИ РАН», 2013 г., №2: «Опто-электронные системы» (в этом выпуске).
3. Р.Р. Загидуллин Управление машиностроительным производством с помощью систем MES, APS, ERP // ТНТ, 2011 г.
4. В.Н. Леньшин, В.В. Куминов Информатизация производственных процессов – путь к эффективному предприятию // Мир компьютерной автоматизации, 2002 г., №№ 1-2.
5. SEMI E10-0600, 2000, Reliability, Availability and Maintainability – RAM // SEMI 1986, 2000 («Технические требования к определению и измерению надежности, готовности к эксплуатации и ремонтопригодности оборудования» Ассоциации производителей полупроводникового оборудования и материалов SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International).

Сравнение расчетов распространения ударных волн в газах, выполненные по программам ENS и NUT_2D

М.Ж. Акжолов[1], О.А. Дмитриев, И.Г. Лебо[2], А.Г. Мадера[3]

1 - кандидат физико-математических наук, 2 –доктор физико-математических наук, профессор
3 – доктор технических наук, профессор

Аннотация:Представлены результаты сравнения расчетов распространения ударных волн в газах, выполненные по программам «ENS» и «NUT_2D». Показано хорошее согласие результатов. Обсуждаются особенности и достоинства этих программ, разработанных по различным методикам.

Ключевые слова: программа ENS, NUT_2D, ударные волны, газодинамика

Введение

В НИИСИ создана двумерная программа «ENS» (Equation of Navies-Stocks) для компьютерного моделирования задач газовой динамики «ENS» [1-3] Уравнения газовой динамики являются примером сложных нелинейных уравнения математической физики, которые в общем случае не имеют аналитических решений. Распространение ударных волн и появление контактных поверхностей двух сред приводят к необходимости рассматривать разрывные, скачкообразные решения [4]. Это обстоятельство вызывает определенные трудности при использовании численной аппроксимации уравнений газовой динамики. Разрабатываются различные методы решения таких задач с помощью ЭВМ. В приведенной ниже работе представлены результаты сравнения моделирования распространения ударных волн в газах, выполненные по программе «ENS» и «NUT_2D» [5-6], разработанной в Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша при участии одного из авторов данной статьи. В основу двух программ были положены различные методики решения уравнений газовой динамики. Так в программе «ENS» используется «метод крупных частиц» [7] для решения задач в лагранжево-эйлеровых координатах. В чисто «эйлеровой» программе «NUT_2D» используются TVD (Total Variation Diminision) [8] разностные схемы повышенного порядка точности.

Постановка задачи

Для сравнения результатов расчетов было выбрано две задачи: 1) отражение ударной волны (УВ) от абсолютно упругой стенки; 2) прохождение через контактную поверхность двух газов сильной ударной волны и ее отражение от стенки. Выбор этих двух задач обусловлен следующими соображениями: отражение от стенки сильной ударной волны является примером такой задачи, где в расчетах, как правило, возникает неустойчивость численного решения в том случае, если не применять специальные меры (искусственную вязкость»). Вторая задача представляет практический интерес в исследованиях по физике ударных волн, а контактная поверхность (КГ) порождает «распад произвольного разрыва», то есть распространение ударных волн (либо волн разгрузки) в противоположных направлениях от контактной поверхности [4].

Решались численно двумерные уравнения газовой динамики для идеальных газов (то есть диссипативные процессы, такие как вязкость, теплопроводность, диссоциация и возбуждение внутренних степеней свободы молекул, из которых состоит газ, не учитывались). Ниже приведены эти уравнения.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+div(\rho W)=0,$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t}+div(\rho u W)+\frac{\partial p}{\partial x}=0,$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t}+div(\rho v W)+\frac{\partial p}{\partial y}=0, \qquad (1)$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t}+div(\rho E W)+div(pW)=0,$$

где $E=J+(u^2+v^2)/2$ - полная энергия, p - давление, ρ - плотность, J - внутренняя энергия единицы массы среды, W - вектор скорости, u, v - компоненты вектора скорости по осям ox и oy, соответственно, t - время.

В (1) записаны уравнения: закон сохранения массы (первое уравнение), законы сохранения импульса (второе и третье уравнения), закон сохранения энергии (четвертое уравнение). Для замыкания системы уравнений (1) используется уравнение состояния идеального газа.

$$p=(\gamma-1)\rho J=(\gamma-1)\rho(E-\frac{u^2+v^2}{2}), \qquad (2)$$

где γ - показатель адиабаты газа.

В программе «NUT_2D» решаются аналогичные уравнения, но добавлено уравнение для расчета массовой концентраций двух компонентов газа ($\xi_i=\rho_i/\rho, \quad i=1,2; \quad \rho_i, \rho -$ плотность

i-компоненты, и плотность смеси). Дополнительно к уравнениям, выписанным выше, решается уравнение непрерывности для одной из компонент

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + div(\rho_1 W) = 0 \qquad (3)$$

Для выделения контактной поверхности применяется «метод маркеров», то есть в окрестности КГ помещаются частицы-маркеры, которые двигаются с локальной скоростью потока (в каждой расчетной ячейке в момент t=0 находится до 10 частиц). Эти частицы соединяются отрезками, что позволяет построить форму границы в заданные моменты времени.

1. Распространение в воздухе ударной волны, и ее отражение от абсолютно упругой стенки

Рассматривается следующая задача. В воздухе распространяется ударная волна с числом Маха M_x = 2 (число Маха это отношение скорости УВ у скорости звука в невозмущенном газе).

Полагаем, что волна плоская и «квазистационарная», то есть термодинамические параметры за фронтом УВ связаны с параметрами перед фронтом с помощью соотношению Гюгонио [4,5]:

$$P_1 = P_0 \frac{2\gamma \cdot M_x^{\ 2} - (\gamma - 1)}{\gamma + 1}, \quad ZP = \frac{P_1}{P_0};$$

$$C_s^2 = \gamma \frac{P_0}{\rho_0}; \quad D = M_x \cdot C_s; \qquad (4)$$

$$\rho_1 = \rho_0 \frac{\gamma + 1 + (\gamma - 1)/ZP}{\gamma - 1 + (\gamma + 1)/ZP};$$

$$u_1^2 = (\gamma \frac{P_1}{\rho_1}) \frac{\gamma - 1 + (\gamma + 1)/ZP}{2\gamma};$$

Соотношения Гюгонио выведены из законов сохранения потоков массы, импульса и энергии в подвижной системе координат на фронте ударной волны. Здесь $P_{1(0)}$, $\rho_{1(0)}$ - давление и плотность за фронтом (перед фронтом) ударной волны, γ – показатель адиабаты, C_S - скорость звука, D – скорость движения фронта ударной волны в лабораторной системе отсчета. Достаточно задать число Маха (M_x) и термодинамические параметры газа перед фронтом ударной волны, чтобы определить соответствующие параметры за фронтом. Скорость движения газа за фронтом ударной волны в лабораторной системе отсчета будет определяться по формуле $v_y = D - u_1$. Показатель адиабаты в воздухе будем полагать постоянным и равным γ=1.4.

На рис.1 показана постановка задачи 1.

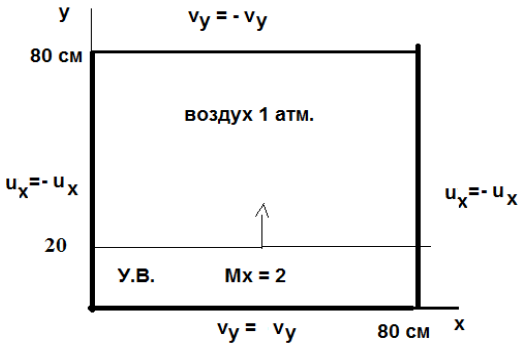
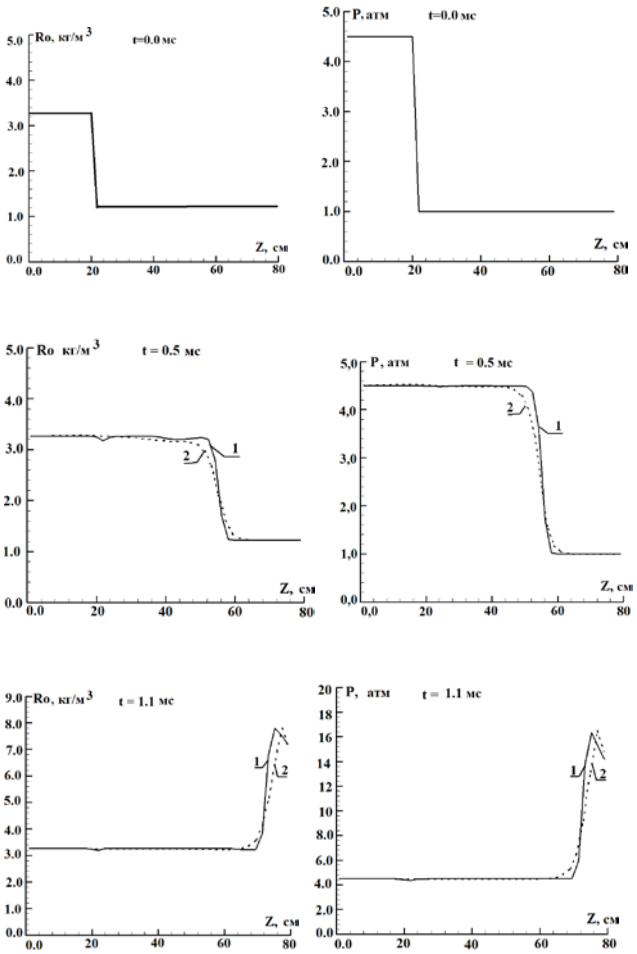


Рис.1. Постановка задачи. Область счета и параметры задачи.

По воздуху с невозмущенным давлением равным 1 атмосфере снизу-вверх движется ударная волна со скоростью в два раза большей скорости звука (M_x = 2). Программы «ENS» и «NUT_2D» являются двумерными, но в настоящей работе для наглядности результатов сравнения рассматриваются «квазиодномерные» задачи. Условие на нижней границе $v_{y1} = v_{y0}$, а на верхней $v_{yn} = -v_{y(n+1)}$. В первом случае это – свободное протекание, во втором – отражение от абсолютно упругой стенки.

На рис.2 представлены результаты сравнения распределений плотности и давления, полученные по двум программам на различные моменты времени.



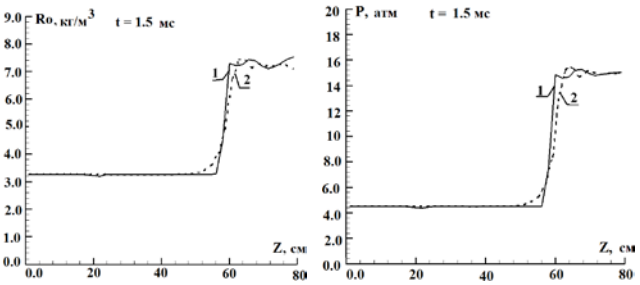


Рис. 2. «Профили» давлений и плотностей на моменты времени t=0 (a), t=0.5 (b), t=1.1 (c), t=1.5 (d) мс. Сплошная линия (1) – расчеты по программе «NUT_2D», штриховая (2) – расчеты по программе «ENS» (с учетом искусственной вязкости).

Если искусственная вязкость не учитывалась, то после отражения от стенки в расчетах по программе «ENS» возникает «болтанка».

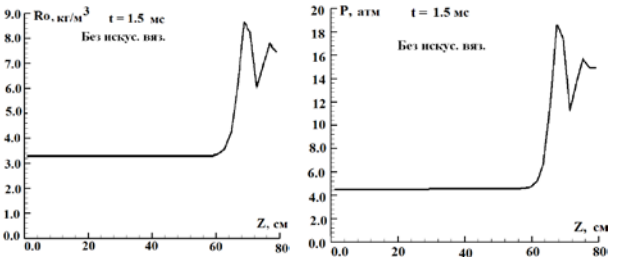


Рис.3. Распределения плотности (*Ro*) и давления (*P*) на момент времени t=1.50 мс. Расчеты сделаны по программе «ENS» (без учета искусственной вязкости).

Согласно [9], в разностную схему была введена искусственная вязкость, которая позволяет сгладить эту неустойчивость численного счета. Ниже приведена форма такой искусственной вязкости. Для оси *x*

$$q = \begin{cases} -\delta\rho\alpha\Delta x\dfrac{\partial u}{\partial x}, & \left|\dfrac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right| - \dfrac{\lambda}{\Delta x}\left|\dfrac{\partial u}{\partial x}\right| > 0, \\ 0, & \left|\dfrac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right| - \dfrac{\lambda}{\Delta x}\left|\dfrac{\partial u}{\partial x}\right| \le 0. \end{cases}$$

Имеется два параметра δ и λ. Были проведены расчеты с различными значениями этих параметров, наилучший эффект получен при δ=2.0 и λ= 1.0 . Из сравнения рис.2d и рис.3 видно, что искусственная вязкость позволяет подавить «болтанку» и добиться хорошего согласия по двум программам.

2. Прохождение ударной волны через контактную поверхность двух газов.

Вторая задача – прохождение ударной волны через контактную поверхность двух газов. Были выбраны два благородных газа криптон (*Kr*) и ксенон (*Xe*) с параметрами, соответствующими экспериментальным и расчетным данным, описанным в [6] (смотри стр.135).

На рис. 4 показана постановка задачи.

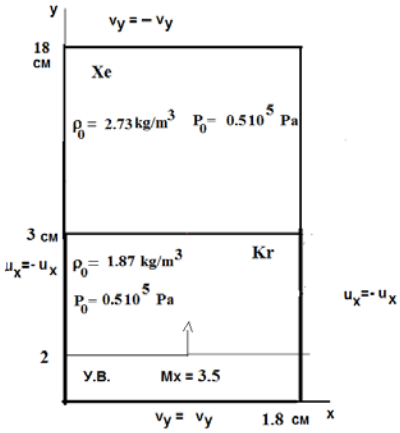


Рис. 4. Постановка задачи. Контакт двух газов – криптон и ксенон. Начальное давление 0,5 атм ($5\cdot10^4$ Паскалей).

На рис. 5 показаны распределения («профили») плотности и давления за фронтом ударной волны на различные моменты времени.

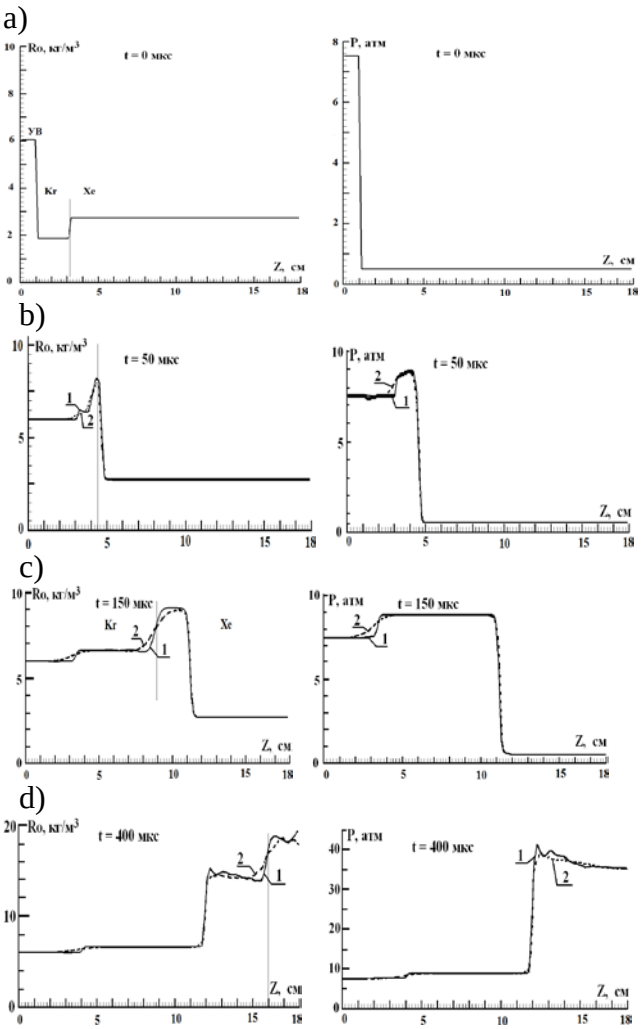


Рис.5. «Профили» давлений и плотностей на моменты времени t=0 (a), t= 50 (b), t=150 (c), t=400 (d) мкс. Сплошная линия (1) – расчеты по программе «NUT_2D», штриховая (2) – расчеты по программе «ENS» (с учетом искусственной вязкости).

Видно из рис.5, что получается удовлетворительное согласие результатов расчетов. Выбраны моменты времени прохождения УВ через КГ (b), приближение к упругой стенке (c), после отражения от стенки (d). В отсутствии искусственной вязкости в профилях давления и плотности возникала «болтанка». Подбирались различные параметры искусственной вязкости. Лучший результат был получен при параметрах $\delta=3.0$ и $\lambda=1.0$.

Выводы

Выше приведены сравнительные результаты расчетов прохождения и отражения ударной волны в газах, полученные по различным методикам. Показано хорошее согласие расчетных результатов, полученных по новой программе «ENS», созданной в НИИСИ РАН с данными, полученными по программе «NUT_2D», которая в свое время была создана в ИПМ РАН специально для моделирования экспериментов по развитию неустойчивостей и турбулентности в сжимаемых средах. В следующих работах планируется провести исследования развития неустойчивости на КГ двух сред и перехода в турбулентное состояние по разработанной методике.

The comparison of numerical simulation of shock wave expansion in gases, which have been made by use “ENS” and “NUT_2D” codes

M.H. Akzholov, O.A. Dmitriev, I.G. Lebo, A.G. Madera

Abstract: The results of comparison of numerical model of shock wave expansion in gases have been presented. The simulations have been made by use of «ENS» и «NUT_2D». codes. A good agreement has been demonstrated.

Keywords: programs ENS, NUT_2D, shock waves, gas dynamics

Литература

1. М.Ж. Акжолов, А.Г. Мадера, П.И. Кандалов, И.Г.Лебо. Компьютерное моделирование конвективных процессов в воздушной среде вблизи электронных устройств // Труды. Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук (НИИСИ РАН) том 1 № 2 ISSN 2225-7349 Москва 2011. С 44-46
2. А.Г. Мадера, М.Ж. Акжолов. И.Г. Лебо. Моделирование развития процессов «конвекция плюс теплопроводность» в воздухе вблизи процессора. // Труды. Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук (НИИСИ РАН) том 3 № 1 ISSN 2225-7349 Москва 2013. С 90-93
3. М.Ж. Акжолов, А.Г. Мадера, И.Г.Лебо. Об эффективности распараллеливания процессов при решении уравнений газовой динамики с помощью суперкомпьютерного комплекса МВС-100К. // Труды. Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук (НИИСИ РАН) том 3 № 2 ISSN 2225-7349 Москва 2013. С 104-106
4. Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. –М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1966
5. В.Ф. Тишкин, В.В. Никишин, И.В. Попов, А.П. Фаворский,. Разностные схемы трехмерной газовой динамики для задачи о развитии неустойчивости Рихтмайера-Мешкова. //Математическое моделирование, 7, №5, 1995, с. 15-25
6. И.Г. Лебо, В.Ф. Тишкин. Исследование гидродинамической неустойчивости в задачах лазерного термоядерного синтеза методами математического моделирования. –М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. -304 с.
7. О.М. Белоцерковский, Ю.М. Давыдов «Метод крупных частиц в газовой динамике. Вычислительный эксперимент.» -М.: Наука, 1982. –392 с.
8. A. Harten. On a class of high resolution total-variation-stable finite-difference schemes // SIAM J. Numeric. Anal. 1984. V.21. No.1, p.1-23
9. Исследование актуальных проблем механики и машиностроения. Под редакцией Ю.М. Давыдова. –М. Национальная академия прикладных наук. 1995. Т.2, с.540

О численном решении уравнения «конвекция-диффузия» в двумерной постановке.

И. Г. Лебо[1], А. И. Симаков[2]

1 –доктор физико-математических наук, профессор, 2 – аспирант

Аннотация: Создана программа “Cooler_2D” для численного решения уравнения «конвекция-диффузия» в двумерной постановке. Получено частное аналитическое решение и с его помощью проведено тестирование программы. Приведены результаты расчетов распространения тепла в подвижной среде.

Ключевые слова: уравнение «конвекция-диффузия», программы, численные расчёты

Введение

Уравнение «конвекции-диффузии» является одним из ярких примеров уравнений математической физики [1-3], и достаточно широко используется в исследованиях для описания различных физических процессов. Поскольку в общем случае такое уравнение не имеет аналитических решений, то представляет интерес разработка программ, позволяющих численно решать это уравнение для произвольных начальных и граничных условий. В статье дается описание программы “Cooler_2D”, которая позволяет методом конечных разностей решать это уравнение в двумерной геометрии. Получено частное аналитическое решение рассматриваемого уравнения для заданной специальным образом зависимости вектора скорости, начальных и граничных условий. Приведен анализ точности расчетов в зависимости от количества узлов разностной сетки.

1. Постановка задачи

Уравнение конвекции-диффузии в векторном виде имеет следующий вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -(v\nabla T) + \nabla\left(\frac{\kappa}{c_\rho \rho}\nabla T\right) + F \qquad (1)$$

Здесь $T\ (x,\ y,\ t)$ – искомая функция (в нашем случае имеет физический смысл температуры в точке $(x,\ y)$ в момент времени t), $\vec{v}$ - вектор скорости, c_V - удельная теплоемкость при постоянном объеме, ρ - плотность среды, κ - коэффициент теплопроводности, который вообще говоря, может зависеть от температуры, пространственных и временных переменных, F – внешний источник. Далее положим $F = 0,\quad \kappa = const$ и обезразмерим уравнение (1). Для этого введем размерные масштабы по пространству, скорости, времени и температуры: $L_0,\quad v_0,\quad t_0 = L_0 / v_0,\quad T_0$.

Физический и геометрический смыслы этих масштабов: размер расчетной области, максимальная скорость, начальная температура. В обезразмеренном виде уравнение (1) записывается следующим образом:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\left(u\frac{\partial T}{\partial x} + w\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \chi\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \qquad (2)$$

где u, w – компоненты скорости по соответствующим направлениям, χ – безразмерный параметр.

Для решения данного уравнения применялась следующая разностная схема с весами $\sigma_{1(2)}$, причем, если вес σ=1 имеет место чисто неявная схема, σ=0, явная:

$$\begin{aligned}
&\frac{\hat{T}_{ik} - T_{ik\tau}}{\tau} = -w_{ik}\sigma_1\frac{\hat{T}_{ik+1} - \hat{T}_{ik-1}}{2h_y} - w_{ik}(1-\sigma_1)\times \\
&\times\frac{T_{ik+1} - T_{ik-1}}{2h_y} - u_{ik}\frac{\overline{T}_{i+1k} - \overline{T}_{i-1k}}{2h_x} + \\
&+\sigma_2\chi\frac{\hat{T}_{ik+1} - 2\hat{T}_{ik} + \hat{T}_{ik-1}}{h_y^{\ 2}} + \qquad (3) \\
&+(1-\sigma_2)\chi\frac{T_{ik+1} - 2T_{ik} + T_{ik-1}}{h_y^{\ 2}} + \chi\frac{\overline{T}_{i+1k} - 2\overline{T}_{ik} + \overline{T}_{i-1k}}{h_x^{\ 2}}.
\end{aligned}$$

Для решения неявной схемы используются продольно-поперечные прогонки с введением искомой функции на промежуточном временном слое (значение такой функции обозначено «черточкой», значение функции на искомом слое обозначено «крышечкой», а на предыдущем слое – без дополнительных значков). В явной схеме сеточные функции «с черточкой» берутся

также с предыдущего слоя. Индекс «*i*» является текущим вдоль оси *0X*, а индекс «*k*» - вдоль оси *0Y*. Величина безразмерного параметра χ определяет характер решения: 1) $\chi >> 1$ - теплопроводный, 2) $\chi \sim 1$ - промежуточный, 3) $\chi << 1$ - конвективный режимы.

2. Частное аналитическое решение.

Рассматривается следующая задача. Решение будем искать в следующем виде:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right)$$
$$u\frac{\partial T}{\partial x} = -w\frac{\partial T}{\partial y} \qquad (4)$$

, то есть подбираем поле скоростей таким образом, чтобы конвекция не оказывала влияние на диффузию.

$$T(x,y,t) = T_0 + T_m \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right)\sin\left(\frac{\pi y}{L}\right)\cdot\exp(-\lambda\cdot t)$$

$$u = -v_0\cdot\left(\frac{\pi}{L}\right)\cdot\sin\left(\frac{\pi x}{L}\right)\cdot\cos\left(\frac{\pi y}{L}\right), \quad \lambda = 2\cdot\chi\cdot\left(\frac{\pi}{L}\right)^2$$

$$w = v_0\cdot\left(\frac{\pi}{L}\right)\cdot\sin\left(\frac{\pi y}{L}\right)\cdot\cos\left(\frac{\pi x}{L}\right)$$

Пусть $T_0 = 1, \quad T_m = 10, \quad v_0 = 1, \quad L_0 = 1, \quad \chi -$ параметр, который в рассматриваемом случае равен 1. Тогда получим следующие профили температур (рис. 1).

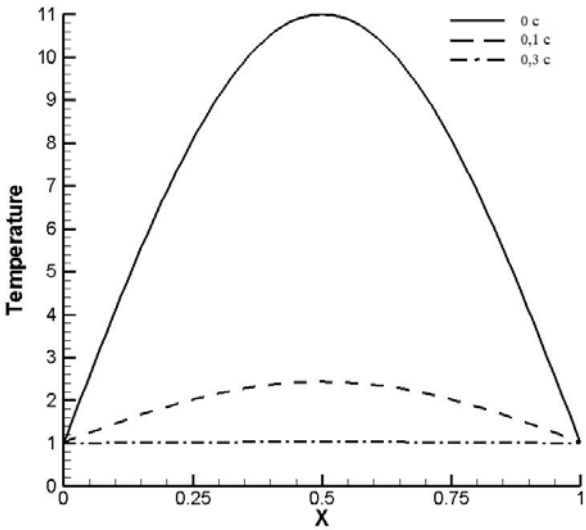


Рис. 1. Профили температур на различные моменты времени, сетка 108x108, *y*=0.5.

Были проведены расчеты на разных сетках (28x28, 54x54, 108x108), чтобы определить влияние количества узлов сетки на точность решения. На рисунке 2 изображен график зависимости суммарной относительной погрешности от времени для различных сеток. Из графика видно, что с увеличением числа узлов сетки повышается точность расчетов приблизительно пропорционально числу узлов сетки.

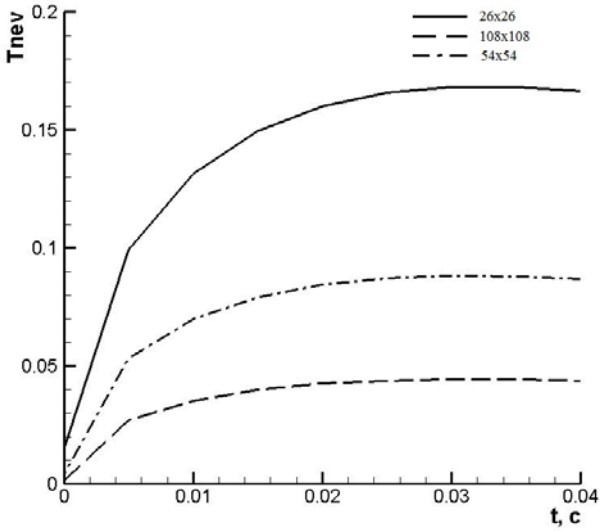
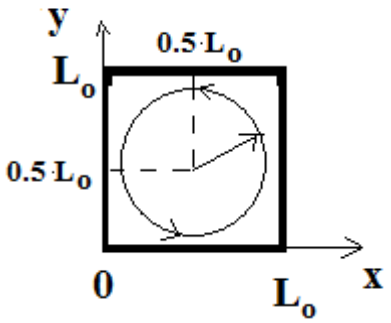


Рис. 2. Относительная погрешность вычислений (*Tnev*) для различных сеток.

3. Решения в случае кругового движения среды («вентилятор»).

В [4] была рассмотрена задача о распространении тепла с учетом «поддува», когда справа и слева от расчетной области были заданы тепловые потоки, сверху и снизу были заданы «открытые» границы, а вдоль оси *OY* задана скорость, равная 0.5 м/с.

Рассмотрим случай следующего поля скоростей:



Такую задачу условно назовем «вентилятором», поскольку потоки среды перемещаются по кругу, причем с постоянной угловой скоростью ω_0 и увеличивающейся линейной скоростью по мере удаления от центра ($x_c = 0.5\cdot L_0, y_c = 0.5\cdot L_0$)

$$\begin{cases} u = \begin{cases} 0, \text{если } r = 0 \\ -\omega_0 \dfrac{y - y_c}{|r|} \sin\left(\dfrac{\pi|r|}{r_0}\right), \text{если } 0 < r < r_0 \\ 0, \text{если } r > r_0 \end{cases} \\ w = \begin{cases} 0, \text{если } r = 0 \\ \omega_0 \dfrac{x - x_c}{|r|} \sin\left(\dfrac{\pi|r|}{r_0}\right), \text{если } 0 < r < r_0 \\ 0, \text{если } r > r_0 \end{cases} \end{cases}$$

где $\omega_0 = 2\pi * n$, $|r| = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}$, $r_0 = L/2.1$, n – число оборотов.

Вентилятор запускался не сразу, а через t=0.3.

Было рассматривалось две задачи:

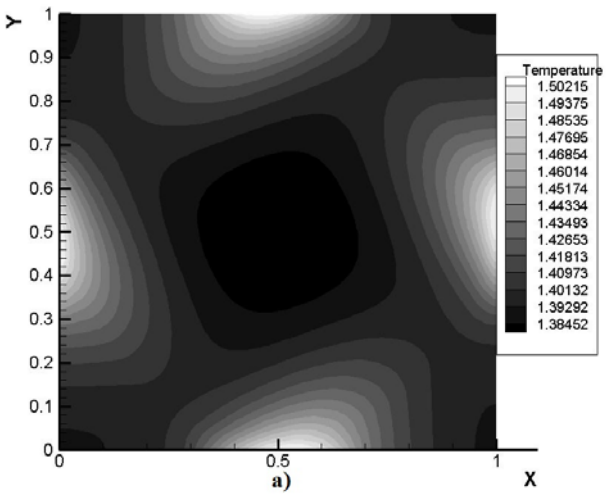
1) С четырех сторон расчетной области задавались потоки, моделирующие тепловыделяющие элементы:

$$\begin{cases} Q_{up} = Q_{down} = \sin\left(\dfrac{\pi x}{L}\right), \text{если } 0.3 < x < 0.7 \\ Q_{left} = Q_{right} = \sin\left(\dfrac{\pi y}{L}\right), \text{если } 0.3 < y < 0.7 \end{cases}$$

На остальных границах – условие полной теплоизоляции (потоки равны 0).

2) В начальный момент времени в центральной части области температура имела вид «купола» (смотри рис.1), а потоки на границах области были равными нулю.

Во всех рассматриваемых расчетах использовалась сетка 108x108 ячеек. На рис. 3а представлено поле температур для первого случая (*ч*=1, *n*=5, *t*=0.4), а на рис. 3б – поле температур для тех же условиях (*ч*=1, *n*=5, *t*=0.4), но при этом «вентилятор» находился в выключенном состоянии, то есть *u*=*w*=*0*. Включение «вентилятора» привело к перераспределению температуры (суммарная тепловая энергия, естественно, осталась прежней).



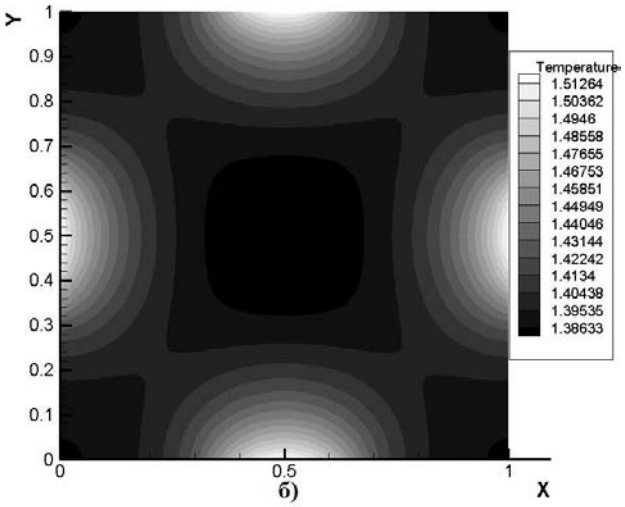


Рис. 3. Поле температур на момент времени t = 0.4 для случаев а) n=5 и б) n=0.

На рис. 4 приведен график баланса энергии для второго случая при *ч*=5; 1; 0.2. По оси абсцисс отложено время, а по оси ординат – относительная погрешность (или «невязка») энергии в системе. Видно, что во всех трех случаях со временем E_{nev} выходит на уровень, равный 7.E-7, то есть баланс энергии в целом соблюдается. Некоторые отличия от нуля объясняются тем, что при численном решении имеется погрешность вычислений.

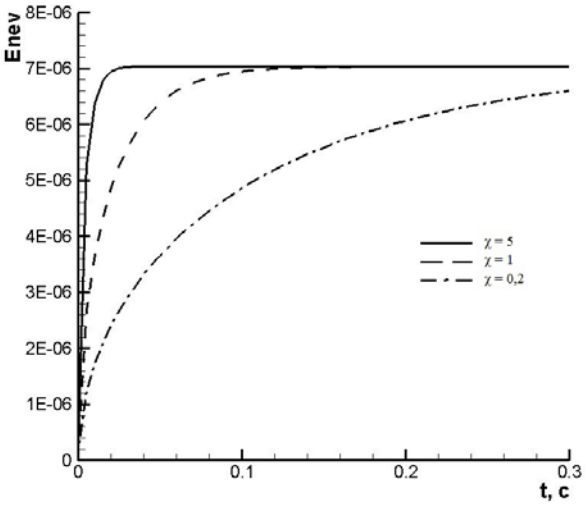


Рис. 4. Баланс энергии при различных *ч*.

В заключение отметим, что ведется работа по созданию трехмерной программы для решения таких задач на параллельном суперкомпьютере.

On the numerical solution of two dimensional equation of “convection-diffusion”.

I.G. Lebo, A.I. Simakov

Abstract: The 2D code “Cooler_2D” for numerical solution of equations of “convection-diffusion” has been made. The partial analytical solution has been derived. It has allowed to carry out the tests of the code. The numerical simulations of heat expansion in moving substance have been made.

Keywords: equation of the "convection-diffusion" program, numerical calculations

Литература

1. А.А. Самарский, П. Н. Вабищевич. Численные методы решения задач конвекции-диффузии, -М.: Едиториал УРСС, 2004. –248 с.
2. Л. А. Крукиер, Г. В. Муратова, Т. Н. Субботина. Эффективные разностные схемы решения нестационарного уравнения конвекции-диффузии с преобладающей конвекцией. // Математическое моделирование том 17 № 12 2005. с. 80-86.
3. Л. А. Крукиер, Т. Н. Субботина. Об одном классе треугольных кососимметричных схем решения нестационарного уравнения конвекции-диффузии. // Известия высших учебных заведений. Математика № 5 (504) 2004. с. 41-46.
4. И. Г. Лебо, А. И. Симаков. Решение двумерного уравнения конвекции-диффузии применительно к задаче о теплообмене вблизи электронных устройств. // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC – 2013» часть 1 Москва 2013. С 40-43.

Анализ методов интерпретации индикаторных диаграмм для скважин с трещинами гидроразрыва пласта при забойном давлении ниже давления насыщения с помощью численного моделирования

С.Г. Вольпин[1], А.В. Свалов, И.В. Афанаскин[1], Д.А. Корнаева[2], А.Р. Саитгареев

1 - кандидат технических наук, 2 - аспирант.

Аннотация: Рассматриваются различные уравнения притока флюида к добывающей скважине. С помощью численного гидродинамического моделирования симулируется исследование методом установившихся отборов вертикальной скважины и скважины с гидроразрывом пласта. Скважины работают при забойном давлении ниже давления насыщения нефти газом. По результатам моделирования строятся и интерпретируются индикаторные диаграммы. Оцениваются различные подходы к интерпретации таких индикаторных диаграмм.

Ключевые слова: уравнения притока флюида, скважина

Введение

Гидродинамические исследования скважин и пластов (ГДИС) являются мощным инструментом для изучения строения и свойств пластов-коллекторов нефти и газа, уточнения геологических моделей таких пластов, а так же для контроля за их разработкой. Существует много методов ГДИС. Наиболее употребимыми и востребованными среди них в настоящее время являются:

1. исследования скважин методом установившихся отборов с построением индикаторных диаграмм;
2. исследования скважин на неустановившихся режимах фильтрации с регистрацией кривых восстановления давления (КВД) в добывающих скважинах и кривых падения давления (КПД) в нагнетательных скважинах;
3. исследования скважин методом гидропрослушивания с регистрацией в реагирующих скважинах кривых реагирования на изменение режима работы возмущающих скважин.

1. Исследования скважин методом установившихся отборов. Уравнения притока жидкости к скважине

Остановимся более подробно на исследованиях скважин методом установившихся отборов. При исследовании скважин методом установившихся отборов дебит скважины изменяют скачкообразно замеряя при этом забойное давление в скважине, рис. 1. Когда после очередного изменения дебита скважины забойное давление стабилизировалось, говорят, что скважина вышла на установившийся режим работы. Используя дебиты скважины и последние точки для каждого установившегося режима на кривой изменения забойного давления, строят индикаторную диаграмму, рис. 2.

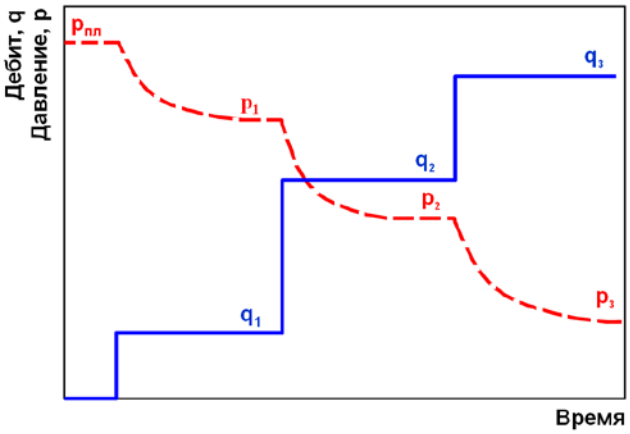


Рис. 1. Исследование скважины методом установившихся отборов

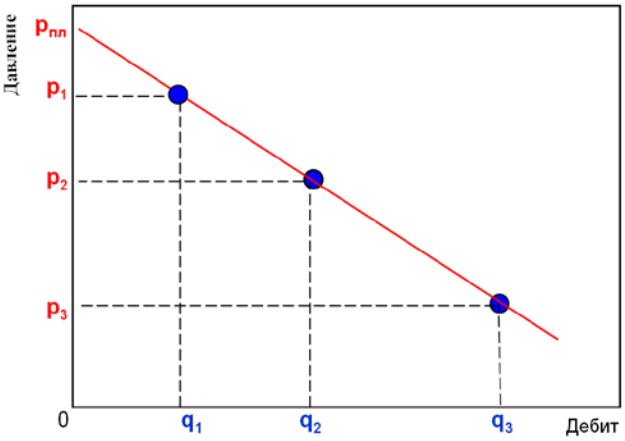


Рис. 2. Классическая индикаторная диаграмма, описываемая линейным законом фильтрации

При интерпретации индикаторных диаграмм определяют коэффициент продуктивности скважины (параметр, связывающий дебит скважины и депрессию на пласт) и оценивают пластовое давление, а так же определяют режим фильтрации.

Установившийся приток жидкости при забойном давлении выше давления насыщения пластовой нефти газом к одиночной вертикальной скважине в однородном пласте с круговым контуром постоянного давления описывается формулой Дюпюи [1]:

$$q = \frac{2\pi kh}{\mu b}\frac{\left(p_{пл} - p_{заб}\right)}{\left(\ln\frac{R_к}{r_c} + S\right)}, \qquad (1)$$

где q - дебит скважины в поверхностных условиях, k - проницаемость пласта по рассматриваемой жидкости, h - эффективная толщина пласта, μ - вязкость жидкости, b - объемный коэффициент (отношение объема жидкости в пластовых условиях к объему жидкости в поверхностных условиях), $p_{пл}$ - пластовое давления (на контуре питания), $p_{заб}$ - забойное давление, $R_к$ - радиус контура питания, r_c - радиус скважины, S - скин-фактор (параметр, характеризующий изменение фильтрационных свойств околоскважинной зоны пласта по сравнению с удаленной зоной).

Формулу (1) можно переписать в следующем виде:

$$q = K_{пр}\left(p_{пл} - p_{заб}\right), \qquad (2)$$

$$K_{пр} = \frac{2\pi kh}{\mu b}\frac{1}{\left(\ln\frac{R_к}{r_c} + S\right)},$$

где $K_{пр}$ - коэффициент продуктивности скважины. С помощью уравнения (2) можно описать индикаторную диаграмму, приведенную на рис. 1.

Существуют более сложные формулы для притока жидкости к скважине. Например, для установившегося притока жидкости при забойном давлении выше давления насыщения пластовой нефти газом к одиночной вертикальной скважине с вертикальной трещиной гидроразрыва пласта в однородном пласте с круговым контуром постоянного давления можно использовать следующую формулу [2]:

$$q = \frac{2\pi \bar{k}h}{\mu b}\frac{\left(p_{пл} - p_{заб}\right)}{\ln\frac{R_к}{r_{эф}}}, \qquad (3)$$

$$\bar{k} = \sum_{i=1}^{n} k_i h_i \Big/ \sum_{i=1}^{n} h_i,$$

$$\ln r_{эф} = (1-\lambda)\ln r_c + \lambda \ln\frac{f}{2} - (1-\lambda)\sum_{m=1}^{\infty}\frac{a^{4m}\lambda}{m\left(1-a^{4m}\lambda\right)},$$

$$a = \sqrt{\frac{1-w}{1+w}},\ f = \sqrt{l^2 - w^2},\ \lambda = \frac{k_{тр} - \bar{k}}{k_{тр} + \bar{k}},$$

где k_i и h_i - проницаемость и эффективная толщина i-ого пропластка, w - ширина трещины, l - длины трещины, $k_{тр}$ - проницаемость трещины. Остальные обозначения аналогичны формуле (1). Предполагается, что трещина пересекает весь пласт от кровли до подошвы и что ширина вдоль трещины не меняется.

Так же для описания установившегося притока жидкости при забойном давлении выше давления насыщения пластовой нефти газом к одиночной горизонтальной скважине, параллельной кровле и подошве пласта, в однородном пласте с эллипсоидальным контуром постоянного давления можно использовать формулу Джоши [3]:

$$q = \frac{2\pi kh\left(p_{пл} - p_{заб}\right)/(\mu b)}{\ln\frac{a + \sqrt{a^2 - l^2}}{l} + \frac{h}{2l}\ln\left(\frac{h}{2r_c}\right)}, \qquad (4)$$

где a - большая полуось эллипса, l - половина длины горизонтального ствола скважины. Здесь скин-фактор не учитывается.

Можно использовать и более сложные формулы для притока жидкости к горизонтальным, наклонным и многозабойным скважинам, например приведенные в работе [4].

Для описания установившегося притока нефти при забойном давлении ниже давления насыщения пластовой нефти газом (приток газированной жидкости) к одиночной вертикальной скважине в однородном пласте с круговым контуром постоянного давления используются формулы Фетковича [5-8]:

$$p_{заб} < p_{нас} < p_{пл}:$$

$$q_н = K_{пр}\left(p_{пл} - p_{нас}\right) + J\left(p_{нас}^2 - p_{заб}^2\right)^n; \qquad (5)$$

$$p_{заб} < p_{пл} < p_{нас}:\ q_н = J\left(p_{пл}^2 - p_{заб}^2\right)^n, \qquad (6)$$

где $q_н$ - дебит нефти, J - аналог коэффициента продуктивности, $n < 1$ - показатель степени, $p_{нас}$ - давление насыщения пластовой нефти газом.

Так же для описания такого притока используется формула Вогеля:

$$p_{заб} < p_{нас} < p_{пл}:$$

$$q_н = K_{пр}\left(p_{пл} - p_{нас}\right) + \frac{Jp_{нас}}{1{,}8}\left(1 - 0{,}2\frac{p_{заб}}{p_{нас}} - 0{,}8\left(\frac{p_{заб}}{p_{нас}}\right)^2\right); \qquad (7)$$

$$p_{заб} < p_{пл} < p_{нас}:$$

$$q_н = \frac{Jp_{пл}}{1{,}8}\left(1 - 0{,}2\frac{p_{заб}}{p_{пл}} - 0{,}8\left(\frac{p_{заб}}{p_{пл}}\right)^2\right). \qquad (8)$$

Аналоги коэффициента продуктивности J в формулах Фетковича (5), (6) и формулах Вогеля (7), (8) не равны друг другу.

Ниже будет показано, что использование формулы Вогеля может приводить к существенным ошибкам в определении дебита скважины.

Существуют и другие подходы к описанию притока нефти к скважине при забойном давлении ниже давления насыщения пластовой нефти газом, например [9-11].

2. Численное моделирование и интерпретация исследований скважин методом установившихся отборов

Для сравнения точности формул Фетковича и Вогеля при описании индикаторных диаграмм вертикальных скважин, работающих ниже давления насыщения, в симуляторе Eclipse компании Schlumberger была построена численная гидродинамическая модель двухфазной изотермической фильтрации нефти и газа.

Сетка модели прямоугольная блочноцентрированная. Количество ячеек по осям X, Y, Z – 71×71×1 шт. Размеры ячеек по осям X, Y – 25×25 м. Размер ячеек по оси Z совпадает с эффективной толщиной пласта – 10 м. Объем граничных ячеек модели увеличен в 10^6 раз, чтобы имитировать условие постоянного давления. В центральной ячейке модели проведено локальное измельчение, т.е. центральная ячейка по осям X, Y разбита на 25 ячеек по каждой оси. Соответственно размеры измельченных ячеек по осям X, Y - 1×1 м. Глубина залегания пласта 2600 м., абсолютная проницаемость 500 мД, пористость 0,15 д.ед., доля коллектора 100 %. В модели фильтруются две фазы – нефть и газ. Относительные фазовые проницаемости (ОФП) в системе нефть-газ представлены на рис. 3. Начальное пластовое давление 236 кгс/см^2. Сжимаемость пласта 1×10^{-5} см^2/кгс. Плотность нефти в поверхностных условиях 830 кг/м^3, плотность газа – 0,93 кг/м^3. Давление насыщения нефти газом 216 кгс/см^2. Растворимость газа в нефти 200 м^3/м^3. Объемный коэффициент нефти 1,1 м^3/м^3. Вязкость нефти 1,1 сПз. Начальная нефтенасыщенность 100 %. Скважина привязана к центру локального измельчения сетки, рис. 4. Скин-фактор скважины 0 ед. Скважина запускается в невозмущенном пласте и работает с постоянным дебитом нефти 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 2000 м^3/сут. Режим работы скважины изменяется после стабилизации забойного давления.

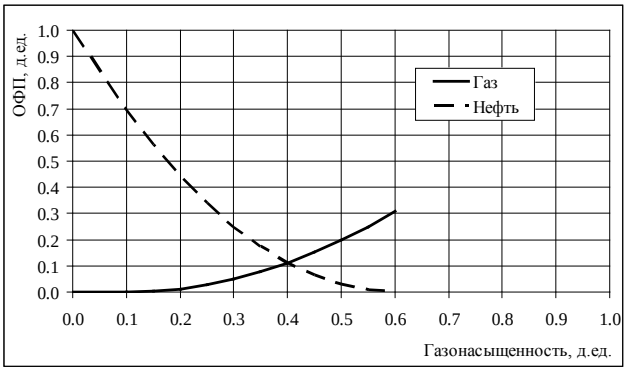


Рис. 3. Относительные фазовые проницаемости (ОФП) в системе нефть-газ

На рис 5. представлена полученная в результате расчетов на симуляторе индикаторная диаграмма для вертикальной скважины, работающей с забойным давлением ниже давления насыщения нефти газом, а так же ее обработка с помощью формул Фетковича и Вогеля. Видно, что кривая, построенная по формуле Вогеля, быстро начинает отклоняться от «экспериментальных» точек. Дебиты нефти, полученные по формуле Вогеля, существенно завышаются по сравнению с «экспериментальными».

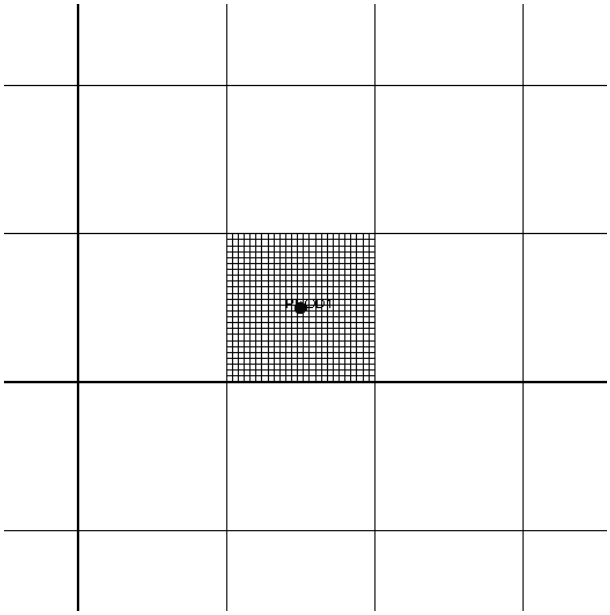


Рис. 4. Расчетная сетка модели в районе скважины. Случай вертикальной скважины

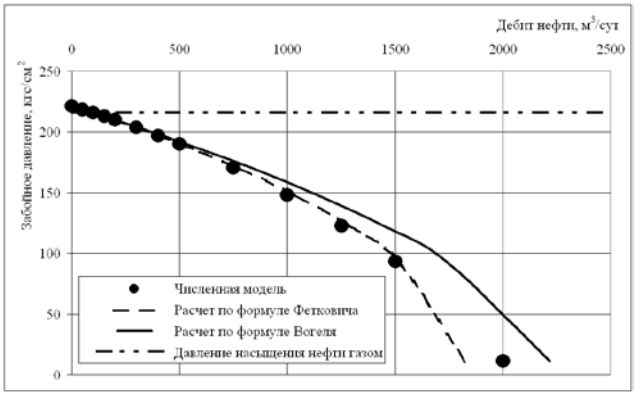


Рис. 5. Индикаторная диаграмма для вертикальной скважины, работающей с забойным давлением ниже давления насыщения нефти газом

Формула Фетковича была получена эмпирически для случая вертикальной скважины. Затем она была выведена аналитически. Формула Вогеля так же получена эмпирически для случая вертикальной скважины. Возникает вопрос, можно ли использовать формулы Вогеля и Фетковича для случая вертикальной скважины с вертикальной трещиной гидроразрыва пласта?

Последнее время этот вопрос становится все более актуальным в связи с переходом к разработке низкопроницаемых нефтяных пластов с массовым проведением гидроразрыва пласта на скважинах. Для ответа на этот вопрос описанная выше модель была несколько модифицирована. Из модели было удалено локальное измельчение сетки. Для центрального ряда ячеек, расположенного вдоль оси Y размер ячеек вдоль

оси X был уменьшен с 25 до 1 метра. В центре модели в центральном ряду ячеек вдоль оси Y была расположена горизонтальная скважина длиной 125 м., рис. 6. Для построенной однослойной модели в плоскости XY приток к такой горизонтальной скважине будет очень близок к притоку к трещине гидроразрыва пласта с бесконечной проводимостью. Таким образом, построена модель одиночной скважины с трещиной гидроразрыва пласта. Все остальные параметры описанной ранее модели не изменились.

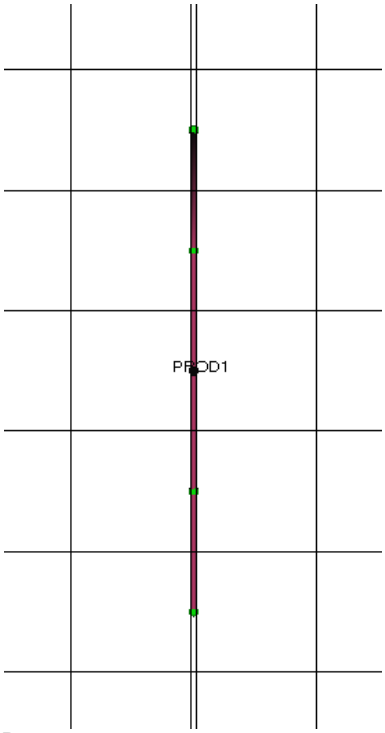


Рис. 6. Расчетная сетка модели в районе скважины. Случай вертикальной скважины с вертикальной трещиной гидроразрыва пласта бесконечной проводимости

На рис 7. представлена полученная в результате расчетов на симуляторе индикаторная диаграмма для вертикальной скважины с вертикальной трещиной гидроразрыва пласта бесконечной проводимости, а так же ее обработка с помощью формул Фетковича и Вогеля. Видно, что «экспериментальная» кривая для случая вертикальной скважины с вертикальной трещиной гидроразрыва бесконечной проводимости описывается формулами Фетковича и Вогеля так же, как кривая для случая вертикальной скважины. При этом индикаторная диаграмма, построенная по формуле Вогеля, быстро начинает отклоняться от «экспериментальных» точек. Дебиты нефти, полученные по формуле Вогеля, существенно завышаются, как и в предыдущем случае.

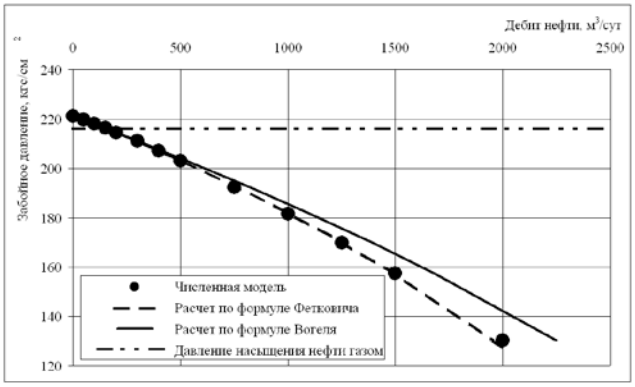


Рис. 7. Индикаторная диаграмма для вертикальной скважины с вертикальной трещиной гидроразрыва пласта бесконечной проводимости, работающей с забойным давлением ниже давления насыщения нефти газом

3. Заключение

В настоящей работе рассмотрен вопрос использования различных формул для притока жидкости к скважине при интерпретации индикаторных диаграмм для скважин с трещинами гидроразрыва пласта при забойном давлении ниже давления насыщения.

С помощью численного гидродинамического моделирования показано, что индикаторная диаграмма для вертикальной скважины, работающей с забойным давлением ниже давления насыщения нефти газом, может быть с хорошей для промысловых целей точностью обработана с помощью формулы Фетковича.

При использовании для этих целей формулы Вогеля расчетная кривая быстро начинает отклоняться от «экспериментальных» точек. Дебиты нефти, полученные по формуле Вогеля, существенно завышаются по сравнению с «экспериментальными».

С помощью численного гидродинамического моделирования показано, что индикаторная диаграмма для случая вертикальной скважины с вертикальной трещиной гидроразрыва пласта с бесконечной проводимостью описывается формулами Фетковича и Вогеля так же, как индикаторная диаграмма для случая вертикальной скважины.

Для случая вертикальной скважины с вертикальной трещиной гидроразрыва бесконечной проводимости индикаторная диаграмма, построенная по формуле Вогеля, быстро начинает отклоняться от «экспериментальных» точек. Дебиты нефти, полученные по формуле Вогеля, существенно завышаются, как и в предыдущем случае.

IPR interpretation methods research using numerical modeling for fractured wells at bottom hole pressure below bubble point

S.G. Volpin, A.V. Svalov, I.V. Afanaskin, D.A. Kornaeva, A.R. Saitgareev

Abstract. Presented overview of different well inflow equations for vertical and fractured wells at steady state regimes by numerical hydrodynamic modeling. Wells are operated at bottom hole pressure below bubble point. After results of numerical modeling IPR curves are constructed and interpreted. Different interpretation approaches are evaluated for mentioned IPR curves.

Keywords: equations of fluid flow, hole

Литература

1. К.С. Басниев, И.Н. Кочина, В.М. Максимов Подземная гидромеханика. М.: Недра, 1993. - 416 с.
2. Р.Д. Каневская Математическое моделирование разработки месторождений нефти и газа с применением гидравлического разрыва пласта. М.: Недра, 1999. – 195 с.
3. S.D. Joshi Augmentation of well productivity with slant and horizontal wells // JPT, June, 1988. - P. 729 - 739.
4. Ю.П. Борисов, В.П. Пилатовский, В.П. Табаков Разработка нефтяных месторождений горизонтальными и многозабойными скважинами. М.: Недра, 1964. - 155 с.
5. M.J. Fetkovich The Isochronal Testing of Oil Wells // SPE 4529. 48-th Annual Fall Meeting, Las Vegas, Nev., Sept. 30 - Oct. 3, 1973.
6. R.G. Camacho, R. Raghavan Inflow Performance Relation-ships for Solution-Gas-Drive Reservoirs // SPE 16204 Production operation symposium, Oklahoma City, Okla., March 8-10, 1987.
7. A-J.A. Al-Khalifah, K. Aziz, R.N. Horn A new approach to multiphase well test analysis // SPE 16743. 62-nd Annual technical conference and exhibition, Dallas, Tex., Sept. 27-30, 1987.
8. K.E. Brown The technology of artificial lift methods. Vol. 4. Penn Well Publishing Company, Tulsa, Okla., 1984.
9. С.А. Христианович О движении газированной нефти в пористых средах. ПММ, т. 5, вып. 2, 1941.
10. И.Т. Мищенко, Р.Ф. Сагдиев Установление режима эксплуатации добывающей скважины при забойном давлении ниже давления насыщения // Нефтяное хозяйство, №4, 2003. - С. 104-106.
11. В.Ф. Усенко Исследование нефтяных месторождений при давлениях ниже давления насыщения. М.: Недра, 1967. – 260 с.

Использование численного термогидродинамического моделирования для обоснования повышения технологической эффективности метода направленной закачки воздуха

С. Г. Вольпин[1], Р.М. Кац[1], И.В. Афанаскин[1]

1 - кандидат технических наук.

Аннотация:Рассматривается математическая модель многофазной многокомпонентной неизотермической фильтрации с химическими реакциями для моделирования закачки воздуха в нефтяные пласты. С помощью численного термогидродинамического моделирования исследуется технологическая эффективность различных вариантов расстановки добывающих и нагнетательных скважин при разработке месторождений высоковязкой нефти методом направленной закачки воздуха. Рассматриваются новые варианты расстановки скважин, позволяющие повысить эффективность изучаемого метода разработки месторождений высоковязких нефтей.

Ключевые слова: термодинамическое моделирование, нефтяные пласты, скважина
.

Введение

В настоящее время в России и в мире наблюдается истощение ресурсной базы так называемой «легко извлекаемой» нефти. Научно-исследовательские организации и нефтедобывающие компании все больше внимания уделяют проблемам разработки трудноизвлекаемых запасов нефти (запасов высоковязкой нефти, запасов нефти в низкопроницаемых коллекторах, запасов нефти в керогеносодержащих коллекторах, остаточных запасов нефти на заводненных месторождениях и др.). Одним из перспективных подходов к добыче некоторых классов трудноизвлекаемых запасов нефти является метод внутрипластового горения, поскольку он сочетает в себе тепловое, газовое и химическое воздействие на нефтенасыщенный пласт-коллектор.

Внутрипластовое горение (ВПГ) - это способ разработки месторождений высоковязкой нефти с целью увеличения конечного нефтеизвлечения, который основывается на использовании энергии, получаемой при частичном сжигании тяжелых фракций нефти (кокса) в пластовых условиях при нагнетании в пласт окислителя (воздуха). Процесс внутрипластового горения обладает всеми преимуществами термических методов вытеснения нефти горячей водой и паром, а также смешивающегося вытеснения, происходящего в зоне термического крекинга, в которой углеводороды переходят в газовую фазу.

Внутрипластовое горение применяется для увеличения нефтеотдачи на месторождениях вязкой и высоковязкой нефти, а так же битумов.

Условия эффективного применения ВПГ следующие:

- Вязкость нефти 50-8000 сПз;
- Плотность нефти не менее 850 кг/м^3;
- Ограниченное содержание серы в нефти;
- Нефтенасыщенность пласта не менее 40%;
- Отсутствие каналов с проницаемостью во много раз превышающей проницаемость основного массива;
- Проницаемость более 100 мД;
- Пористость 10-40%;
- Толщина пласта более 2-3 м.

В СССР ВПГ в той или иной мере применялось на месторождениях Балаханы-Сабунчи-Романинском (Хорасаны), Ширванском, Нефтяно-Ширванском, Арланском, Павлова Гора, Старогрозненском, Сходницком, и других.

При удачном сочетании геолого-промысловых параметров и правильной организации работ ВПГ позволяет достигать нефтеотдачи 50-80%.

В статье рассматривается одна из модификаций ВПГ – метод направленной закачки воздуха, который позволяет повысить охват пласта процессом ВПГ и достигать высоких дебитов по нефти, что существенно повышает экономическую эффективность процесса [1]. Дается оценка технологической эффективности метода направленной закачки воздуха с помощью численного термогидродинамического моделирования в программном комплексе Eclipse компании Schlumberger в сравнении с заводнением и классическим сухим внутрипластовым горением при разработке месторождений высоковязкой нефти в высокопроницаемых терригенных коллекторах.

1. Математическая модель

Рассмотрим некоторые особенности математической модели многофазной многокомпонентной неизотермической фильтрации с химическими реакциями, позволяющей описывать процесс внутрипластового горения [2-10].

В силу того, что скорости обменных процессов между фазами существенно выше характерных

скоростей фильтрации в пористой среде, принимается гипотеза локального термодинамического равновесия.

В модели фильтрации выделяют до четырех фаз, при использовании четырех фаз можно выделить от четырех и более компонент:

❖ водная фаза (вода) – не смешивается с углеводородными фазами, состоит из одной компоненты – воды;

❖ жидкая углеводородная фаза (нефть) – состоит из смеси углеводородных компонент, находящихся при данном давлении, температуре и концентрациях других компонент в жидком состоянии;

❖ газообразная углеводородная фаза (газ) – состоит из смеси углеводородных компонент, компоненты-кислорода, компоненты-воды и др. газообразных компонент, находящихся при данном давлении, температуре и концентрациях других компонент в жидком состоянии;

❖ твердая фаза («кокс») – состоит из одной твердой компоненты, например кокса или парафина.

Насыщенность S_α подвижных фаз ($\alpha = w,o,g$ - вода, нефть, газ) – доля объема пористой среды, доступная для подвижных фаз, занимаемая фазой, определяется как:

$$S_\alpha = \frac{V_\alpha}{V_f} = \frac{V_\alpha}{V_w + V_o + V_g},\ \alpha = w,o,g\ , \qquad (1)$$

$$S_w + S_o + S_g = 1,$$

где V_f - «подвижный» поровый объем; V_α , $\alpha = w,o,g$, - объемы нефтяной, водяной и газовой фаз.

Насыщенность твердой фазы вводится как:

$$\overline{S}_s = \frac{V_s}{V_p}, \qquad (2)$$

где V_s - объем твердой фазы, V_p - поровый объем.

Тогда пористость, доступная для жидких фаз, определяется как:

$$\hat{o}_f = \hat{o}\left(1 - \overline{S}_s\right), \qquad (3)$$

где $\hat{o}$ - пористость.

Тогда приведенные насыщенности жидких фаз $\overline{S}_\alpha$ ($\alpha = w,o,g$):

$$\overline{S}_\alpha = \left(1 - \overline{S}_s\right) S_\alpha\ ,\ \alpha = w,o,g\ , \qquad (4)$$

так что

$$\overline{S}_s + \overline{S}_w + \overline{S}_o + \overline{S}_g = 1\,. \qquad (5)$$

Закон сохранения массы записывается отдельно для каждого компонента в молях с учетом фильтрации; сжимаемости флюидов, твердых углеводородных компонентов и породы; работы скважин; химических реакций:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[\hat{o}\left(1 - \overline{S}_s\right) N_c\right] = \nabla\left[\sum_{\alpha=1}^{n_\alpha^/}\left(x_{c,\alpha}\xi_\alpha \vec{W}_\alpha\right)\right] + \overline{q}_c + \overline{q}_{Ri}\ ,$$

$$c = 1,...,n_c^/\ , \qquad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\hat{o}\,\overline{S}_s N_c\right) = \overline{q}_{Ri}\ ,\ c = n_c^/ + 1,...,n_c\ , \qquad (7)$$

где N_c - молярная плотность компоненты c , ξ_α - молярная плотность фазы α , $\vec{W}_\alpha$ - вектор скорости потока фазы α , $\overline{q}_c$ - мольная плотность потока компоненты c за счет скважин, $\overline{q}_{Ri}$ - мольная плотность потока компоненты c за счет химических реакций, n_α - количество фаз, $n_\alpha^/$ - количество подвижных фаз, n_c - общее количество компонент, $n_c^/$ - количество подвижных компонент, ∇ - оператор Гамильтона, $\vec{W}_\alpha$ - скорость фильтрации, $x_{c,\alpha}$ - мольная концентрация компонента c в фазе α .

В качестве закона сохранения количества движения используется обобщенный закон Дарси:

$$\vec{W}_\alpha = -\frac{kk_{r\alpha}}{\mu_\alpha}\left(\nabla P + \nabla P_{c\alpha} - \rho_\alpha g \nabla D\right), \qquad (8)$$

где g - гравитационная постоянная; k - абсолютная проницаемость пласта; $k_{r\alpha}$ - относительная фазовая проницаемость; μ_α и ρ_α - динамическая вязкость и массовая плотность фазы α ; $D = D(x,y,z)$ - превышение точки пласта с координатами (x,y,z) над некоторой горизонтальной плоскостью; P и $P_{c\alpha}$ - расчетное давление (давление в нефтяной фазе) и капиллярное давление соответственно.

Закон сохранения энергии записывается для системы в целом, как изменение внутренней энергии блока расчетной сетки (нефть, газ, вода, твердая фаза, порода) за счет конвективного потока из (в) соседние точки среды, потока энергии за счет теплопроводности, потока энергии за счет химических реакций, потока энергии из (в) скважины и потока энергии за счет обмена с внешней средой:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(U_b\right) = F_e + C_e + Q_{\mathrm{Re}} + Q_e^w - Q_L\ , \qquad (9)$$

где U_b - внутренняя энергия блока; F_e - конвективный поток энтальпии из (в) соседние точки среды, определяемый как

$$F_e = \nabla\left[\sum_{\alpha=1}^{n_\alpha^/}\left(H_\alpha \xi_\alpha \vec{W}_\alpha\right)\right], \qquad (10)$$

где H_α - энтальпия фазы; C_e - поток энергии за счет теплопроводности, определяемый как:

$$C_e = \nabla\left(K_b \nabla T\right), \qquad (11)$$

где K_b - теплопроводность блока, T - температура; Q_{Re} - поток энергии за счет химических реакций; Q_e^w - поток энергии из (в) скважины, определяемый как:

$$Q_e^w = \sum_{\alpha=1}^{n_\alpha^/}\left(H_\alpha \xi_\alpha Q_\alpha\right), \qquad (12)$$

где Q_α - объемный дебит (расход) фазы α участка перфорации скважины, находящегося в блоке; Q_L - потери энергии за счет обмена с внешней средой.

Состояние каждой фазы α ($\alpha = w,o,g,s$) задается следующими величинами (неизвестными, определяемыми в процессе расчета):

➢ $T = T(t,x,y,z)$ - температура среды (фазы предполагаются находящимися в термодинамическом

равновесии, поэтому температуры всех фаз и породы в точке среды совпадают);

- $P_\alpha = P_\alpha(t,x,y,z)$ - давление в фазе α ($\alpha = w,o,g$);
- $S_\alpha = S_\alpha(t,x,y,z)$, $\alpha = w,o,g$, $\overline{S}_s = \overline{S}_s(t,x,y,z)$ - насыщенность фазы.

Количество неизвестных величин сокращается с помощью соотношений:

$$P_g - P_o = P_{cog}(S_g), \quad (13)$$

$$P_o - P_w = P_{cow}(S_w), \quad (14)$$

$$S_w + S_o + S_g = 1, \quad (15)$$

где $P_{cog}(S_g)$ - капиллярное давление в системе нефть-газ, $P_{cow}(S_w)$ - капиллярное давление в системе вода-нефть (задаваемые функции).

Фазы α, $\alpha = w,o,g,s = 1,...,n_\alpha$ разделяются на 2 группы: «подвижные» (вода, нефть, газ) $\alpha = w,o,g = 1,..,n'_\alpha$, $n'_\alpha = n_\alpha - 1$ и твердую $\alpha = s = n_\alpha$. Компоненты c, $c = 1,...,n_c$, так же разделяются на 2 группы:

- $c = 1,...,n'_c$ - компоненты, которые могут быть только в «подвижных» фазах;
- $c = n'_c + 1,...,n_c$ - компоненты, которые могут быть только в твердой фазе.

Распределение компонент по фазам задается $n_c \times n_\alpha$ матрицей концентраций $x_{c,\alpha} = x_{c,\alpha}(P_\alpha, N)$, $N = (N_1,...,N_{n_c})$:

$$\sum_{\alpha=1}^{n'_\alpha} x_{c,\alpha}\xi_\alpha S_\alpha = N_c,\ c \in \{1,...,n'_c\};\ x_{c,s}\xi_s \overline{S}_s = N_c,$$

$$c \in \{n'_c + 1,...,n_c\}. \quad (16)$$

где $\xi_\alpha = \xi_\alpha(P_\alpha, N)$ - молярная плотность фазы α.

Поскольку считая $c = w = 1$

$$\sum_{c=1}^{n_c} x_{c,\alpha} = 1,\ \alpha \in \{1,...,n_\alpha\};\ x_{c,s} = 0,\ c \in \{1,...,n'_c\};$$

$$x_{c,\alpha} = 0,\ c \in \{n'_c + 1,...,n_c\},\ \alpha \in \{1,...,n'_\alpha\};\ x_{c,w} = 0,$$

$$c \in \{2,...,n_c\}, \quad (17)$$

если формально обозначить $S_s = \overline{S}_s$, то

$$\sum_{\alpha=1}^{n_\alpha} x_{c,\alpha}\xi_\alpha S_\alpha = N_c,\ c \in \{1,...,n_c\}, \quad (18)$$

а так же

$$\overline{S}_s = \frac{1}{\xi_s} \cdot \sum_{c=n'_c+1}^{n_c} N_c,$$

$$x_{c,s} = N_c \Big/ \sum_{k=n'_c+1}^{n_c} N_k,\ c \in \{n'_c + 1,...,n_c\}. \quad (19)$$

Вводится число M_α молей «подвижной» фазы α, $\alpha = w,o,g$, приходящееся на единицу объема. Очевидно, что

$$\sum_{\alpha=1}^{n'_\alpha} M_\alpha = N_{tot} = \sum_{c=1}^{n'_c} N_c. \quad (20)$$

Обознается $R_\alpha = M_\alpha / N_{tot}$ - доля «подвижной» смеси компонент, находящихся в фазе α, по отношению к общему количеству смеси. Тогда

$$M_\alpha = R_\alpha N_{tot},\ \sum_{\alpha=1}^{n'_\alpha} R_\alpha = 1. \quad (21)$$

Обознается $M_{c,\alpha} = x_{c,\alpha} M_\alpha$ - число молей компоненты c, $c = 1,...,n'_c$, в фазе α, $\alpha = w,o,g$, на единицу объема. Тогда

$$N_c = \sum_{\alpha=1}^{n'_\alpha} M_\alpha x_{c,\alpha} = N_{tot} \sum_{\alpha=1}^{n'_\alpha} R_\alpha x_{c,\alpha},\ c = 1,...,n'_c. \quad (22)$$

Поскольку водная компонента не присутствует в нефтяной фазе и углеводородных компонент нет в водной фазе, то:

$$x_{1,o} \equiv x_{w,o} = 0;\ x_{c,w} = 0,\ c \in \{2,...,n'_c\};\ x_{w,w} = 1 \quad (23)$$

и при обозначении $z_c = N_c / N_{tot}$, $c = 1,...,n'_c$, получается:

$$z_w = R_w x_{w,w} + R_g x_{w,g};\ z_c = R_o x_{c,o} + R_g x_{c,g},$$

$$c \in \{2,...,n'_c\}. \quad (24)$$

Для расчета фазовых равновесий задаются такие константы равновесия $K_c = K_c(P,T)$, $c \in \{1,...,n'_c\}$, что:

$$x_{w,g} = K_w(P,T) x_{w,w},\ x_{c,g} = K_c(P,T) x_{c,o},$$

$$c \in \{2,...,n'_c\}. \quad (25)$$

Из уравнений (25) получается для $c \in \{2,...,n'_c\}$:

$$x_{w,g} = K_w,\ x_{c,o} = z_c \frac{1}{R_o + K_c R_g},$$

$$x_{c,g} = z_c \frac{K_c}{R_o + K_c R_g}. \quad (26)$$

Из условий равновесия:

$$\sum_{\alpha=1}^{n'_\alpha} R_\alpha = 1,\ \sum_{c=1}^{n'_c} x_{c,\alpha} = 1,$$

получается

$$R_w = z_w - R_g K_w,\ R_o = 1 - z_w - R_g(1 - K_w),$$

$$x_{w,g} = K_w, \quad (27)$$

$$x_{c,o} = \frac{z_c}{1 - z_w + R_g(K_c + K_w - 1)},$$

$$x_{c,g} = \frac{z_c K_c}{1 - z_w + R_g(K_c + K_w - 1)} \quad (28)$$

и $R_g \in [0,1]$ является решением уравнения

$$F(R_g) = \sum_{c=2}^{n'_c} \frac{z_c(K_c + K_w - 1)}{1 - z_w + R_g(K_c + K_w - 1)} = 0. \quad (29)$$

Значения констант равновесия компонент $K_c = K_c(P,T)$ задаются корреляционной формулой:

$$K_c(P,T) = (A_c + B_c/P + C_c P) \cdot \exp[-D_c/(T - E_c)], \quad (30)$$

где коэффициенты A_c, B_c, C_c, D_c и E_c являются постоянными для каждого компонента.

Внутренняя энергия блока вычисляется из внутренних энергий «подвижных» фаз, твердой фазы и породы (в расчете на единичный объем) умножением на величину объема:

$$U_b(P,T)=V_b\hat{o}\left(1-\overline{S}_s\right)\left\{\sum_{\alpha=1}^{n_\alpha^/}\left[\xi_\alpha(P,T)H_\alpha(T)-P\right]\right\}+ \\ +V_b\hat{o}\,\overline{S}_s\xi_s(P,T)H_s(T)+V_b(1-\hat{o})H_r(T), \quad (31)$$

где V_b - объем расчетного блока, H_r - энтальпия породы.

Теплопроводность расчетного блока задается как:

$$K_b=\hat{o}\left(1-\overline{S}_s\right)\left(K_wS_w+K_oS_o+K_gS_g\right)+ \\ +\hat{o}K_s\overline{S}_s+(1-\hat{o})K_r. \quad (32)$$

Стехиометрическое уравнение для химической реакции r записывается как:

$$\sum_i\left(S_{Rri}C_i\right)\to\sum_j\left(S_{\mathrm{Pr}\,j}C_j\right), \quad (33)$$

где $S_{Rr}=\left(S_{Rri}\right)_{i=1,\dots,n_c}$ - вектор стехиометрических коэффициентов для реагента в реакции r; $S_{\mathrm{Pr}}=\left(S_{\mathrm{Pr}\,i}\right)_{i=1,\dots,n_c}$ - вектор стехиометрических коэффициентов для продукта в реакции r.

Скорость реакции r задается как:

$$R_r=V_p\cdot\hat{o}^{\,n_{rp}}\cdot\left(1-\overline{S}_s\right)^{n_{rs}}\cdot A_r\cdot \\ \cdot\exp\left[-E_r/(R\cdot T)\right]\cdot\prod_{i\in F_r}\left(c_{ri}^/\right)^{n_{ri}}. \quad (34)$$

где A_r - скорость реакции r; E_r - энергия активации реакции r; $\left(n_{ri}\right)_{i=1,\dots,n_c}$ - веса компонент, влияющих на реакцию r (для не реагентов $n_{ri}>0$ в случае катализатора и $n_{ri}<0$ в случае ингибитора), R - газовая постоянная, $c_{ri}^/=\hat{o}\cdot c_{ri}$, c_{ri} - концентрация компонента в фазе, участвующей в реакции, n_{rp}, n_{rs} - показатели степени для учета влияния пористости и доли подвижных фаз на скорость реакции (должны быть неотрицательными), $F_r=\{1,\dots,n_c\}$.

Поток компонентов Q_{Ri} за счет химических реакций и поток энергии Q_{Re}, возникающий в силу химических реакций, определяются как:

$$Q_{Ri}=\sum_{r=1}^{n_r}\left(S_{\mathrm{Pr}\,i}-S_{Rri}\right)R_r, \quad (35)$$

$$Q_{\mathrm{Re}}=\sum_{r=1}^{n_r}H_rR_r, \quad (36)$$

где H_r - энтальпия реакции r; i - номер реагента.

Дебит компонента в соединении l вычисляется как:

$$\overline{Q}_{lc}=\sum_\alpha x_{lc\alpha}\xi_{l\alpha}\overline{Q}_{l\alpha}, \quad (37)$$

$$\overline{Q}_{l\alpha}=K_{\exp}WI_l\left\{k_lh_lT_{l\alpha}\left[P_l-P_w-\overline{\gamma}\left(D_l-D_{ref}\right)\right]\right\}, \quad (38)$$

где $\alpha=o,w,g$; $l=1,2,\dots,N_p$; $x_{lc\alpha}$ - мольная концентрация компонента c в фазе α в соединении l (вычисляется из уравнений фильтрации для добывающих скважин и задается для нагнетательных скважин); $\xi_{l\alpha}$ - мольная плотность фазы α в соединении l (для нефти и газа рассчитывается из уравнения состояния), WI_l - коэффициент скважины для интервала перфорации l; k_l - абсолютная проницаемость ячейки, содержащей интервал l; h_l - толщина интервала l; $\overline{\gamma}$ - осредненный удельный вес жидкости в стволе скважины; D_l - глубина интервала l; D_{ref} - опорная глубина; N_p - число интервалов перфорации; $K_{\exp}$ - коэффициент эксплуатации скважины.

Значение подвижности в формуле (38) вычисляется как:

$$T_{l\alpha}=k_{lr\alpha}/\mu_{l\alpha}. \quad (39)$$

где $k_{lr\alpha}$ - относительная фазовая проницаемость, зависящая от насыщенности в ячейке, содержащей интервал l; $\mu_{l\alpha}$ - динамическая вязкость.

Коэффициент скважины в выражении (23) вычисляется как:

$$WI_l=\frac{2\pi}{\ln\left(\dfrac{r_{bl}}{r_{wl}}\right)+S_l}, \quad (40)$$

где r_{bl} - эквивалентный радиус сеточного блока, содержащего интервал l; r_{wl} - радиус скважины в интервале l; S_l - скин-фактор в интервале l.

Эквивалентный радиус сеточного блока, содержащего интервал l, рассчитывается с помощью формулы Писмана (приводится для вертикальной скважины):

$$r_{bl}=0{,}28\frac{\sqrt{\sqrt{\dfrac{k_{yl}}{k_{xl}}}\Delta x_l^2+\sqrt{\dfrac{k_{xl}}{k_{yl}}}\Delta y_l^2}}{\sqrt{\dfrac{k_{yl}}{k_{xl}}}+\sqrt{\dfrac{k_{xl}}{k_{yl}}}}, \quad (41)$$

где k_{xl} и k_{yl} - абсолютные проницаемости сеточного блока, содержащего интервал l, по соответствующим направлениям; Δx_l и Δy_l - размеры сеточного блока, содержащего интервал l.

Плотности источников (стоков) и плотность потока компонентов за счет химических реакций вычисляются как:

$$\overline{q}_{lc}=\frac{\overline{Q}_{lc}}{V_b},\ \overline{q}_{Ri}=\frac{\overline{Q}_{Ri}}{V_b}. \quad (42)$$

Для расчета мольной и массовой плотности фаз используется уравнение Редлиха-Квонга с нулевыми коэффициентами попарного взаимодействия.

Капиллярные давления и относительные фазовые проницаемости задаются как функции насыщенности соответствующих фаз. Для расчета фазовой проницаемости нефти в трехфазном потоке используется вторая модель Стоуна.

Считается, что рассматриваемый пласт окружен бесконечными по простиранию и однородными по тепловым свойствам породами. Потери энергии за счет обмена с внешней средой через кровлю и подошву

пласта рассчитываются по стандартной аналитической схеме Vinsome-Westerveld [11].

В настоящей работе система уравнений (6)-(9) решается в программном комплексе Eclipse компании Schlumberger с помощью полностью неявной разностной схемы на блочноцентрированной сетке. Ячейки сетки представляют собой прямоугольные параллелепипеды. Для решения нелинейных уравнений используется метод Ньютона. Система линейных уравнений на каждой ньютоновской итерации решается методом Nested Factorization с ускорением за счет применения метода Ортомина [12].

2. Численные эксперименты

Для вышеупомянутой оценки технологической эффективности метода направленной закачки воздуха была построена цифровая фильтрационная модель со следующими параметрами: число ячеек - 25×6×5; размеры ячеек 12×12×4 м.; общие размеры пласта 300×72×20 м.; пористость 25%; горизонтальная проницаемость 700 мД; вертикальная проницаемость 70 мД; объемная теплоемкость пласта 2216 кДж/м^3/^{0}С, коэффициент теплопроводности 10,13 кДж/м/час/^{0}С. Начальные параметры пласта: пластовая температура 30 ^{0}С; пластовое давление 100 атм; водонасыщенность 20%; газа нет. При расчете использованы следующие компоненты: O_2, CO_2, N_2, вода и псевдокомпоненты: фракция тяжелой нефти, фракция легкой нефти, кокс. Наличием растворенного в нефти природного газа можно пренебречь, т.к. высоковязкие нефти обычно содержат небольшое количество растворенного газа. На начальный момент времени углеводородная компонента в пласте представлена только фракцией тяжелой нефти. На рис. 1 (а) и (б) представлены использованные относительные фазовые проницаемости систем нефть-вода и газ-нефть, на рис. 2 зависимость вязкости фракции тяжелой нефти в жидкой фазе от температуры. Вязкость тяжелой нефти несколько завышена, как и в работе [4]. Зависимостью вязкости от давления пренебрегается. Вязкость нефти в начальных пластовых условиях (30 ^{0}С и 100 атм.) составляет 1000 сПз.

Модель химических реакций была взята из работы [4] со следующими реакциями:

реакция 1: горение тяжелой нефтяной фракции

$$HEAVY+18{,}5O_2 \rightarrow 12CO_2+13H_2O,$$

реакция 2: горение легкой нефтяной фракции

$$LIGHT+5O_2 \rightarrow 3CO_2+4H_2O,$$

реакция 3: пиролиз тяжелой нефтяной фракции

$$HEAVY \rightarrow 2LIGHT+4{,}67COKE,$$

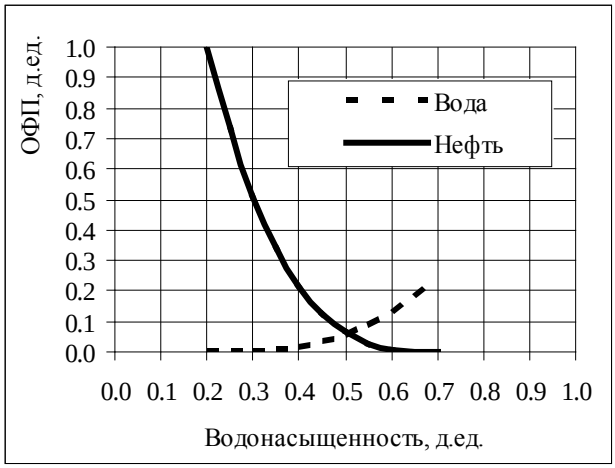
реакция 4: горение кокса

$$COKE+1{,}25O_2 \rightarrow CO_2+0{,}5H_2O,$$

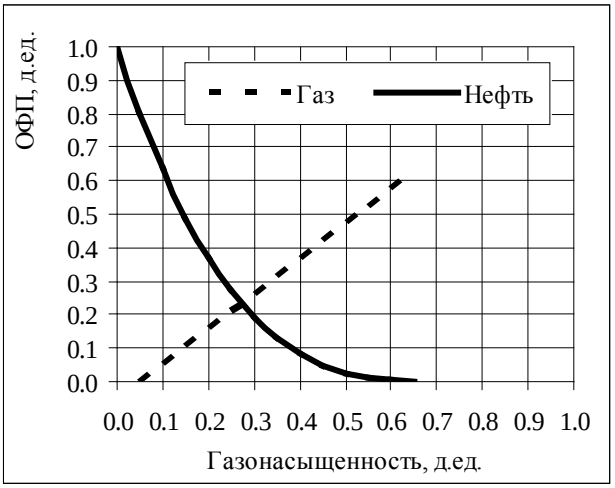
где HEAVY – фракция тяжелой нефти, LIGHT – фракция легкой нефти, COKE – кокс. Концентрация остаточного топлива 19 кг/м^3.

Параметры химических реакций указаны в табл. 1.

Молекулярная масса кокса принята 13 а.е.м. Плотность кокса при температуре 15 ^{0}С и давлении 1 атм. равна 1200 кг/м^3.



(а)



(б)

Рис. 1. Относительные фазовые проницаемости (ОФП) систем нефть-вода (а) и газ-нефть (б)

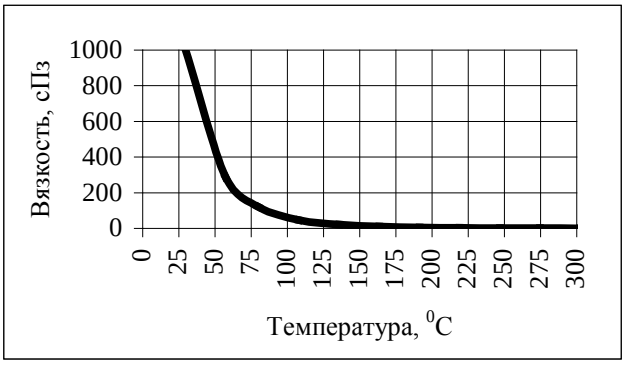


Рис. 2. Зависимость вязкости фракции тяжелой нефти в жидкой фазе от температуры

Для оценки технологической эффективности метода направленной закачки воздуха по сравнению с заводнением и классическим сухим ВПГ было рассмотрено семь расчетных вариантов разработки. Варианты 1 и 2 – заводнение, варианты 3 и 4 – классическое сухое ВПГ, варианты с 5 по 7 – направленная закачка воздуха (ее разновидность THAI – закачки воздуха от «носка» горизонтальной скважины к «пятке»).

Таблица 1

Параметры химических реакций

	Скорость реакции, кг-моль/сут	Константа энергии активации, кДж/кг-моль	Энтальпия реакции, кДж/кг-моль
Реакция 1	$0{,}45\times10^6$	33300	$8{,}18\times10^6$
Реакция 2	$0{,}45\times10^6$	33300	$2{,}22\times10^6$
Реакция 3	$0{,}135\times10^6$	28800	$4{,}69\times10^6$
Реакция 4	$0{,}45\times10^6$	23400	$0{,}54\times10^6$

Свойства флюидов взяты из работы [4]. Свойства фракций нефти представлены в табл. 2.

Таблица 2

Свойства фракций нефти

	Фракция тяжелой нефти	Фракция легкой нефти
Молекулярная масса, а.е.м.	170	44
Критическое давление, атм.	18,5	43,1
Критическая температура, ^{0}С	897	735
Плотность, кг/м^3	при 1 атм. и 0 ^{0}С равна 853	при 70 атм. и 0 ^{0}С равна 747
Сжимаемость, 1/атм.	$1{,}0\times10^{-5}$	$2{,}2\times10^{-4}$
Коэффициент температурного расширения, 1/К	$3{,}0\times10^{-4}$	$6{,}2\times10^{-4}$
Теплота парообразования, кДж/кг	615	213

Расстановка скважин на расчетной сетке для вариантов 1-7 представлена ни рис. 3. Управляющие параметры и показатели разработки по вариантам расчета представлены в табл. 3. Температура закачиваемой воды на забое составляет 30 ^{0}С, воздуха - 100 ^{0}С. Установлено, что повышение температуры закачиваемого воздуха выше 100 ^{0}С нецелесообразно [13]. Начальная температура пласта имеет решающее значение для эффективной реализации внутрипластового горения [2, 14, 15]. Для расчетов заводнения в качестве ограничения принята обводненность продукции 98%. На момент прекращения расчетов заводнения (через 360 мес.) обводненность скважины менее 98%. Дальнейший расчет заводнения признан нецелесообразным в виду крайне медленного доотмыва высоковязкой нефти водой пластовой температуры после прорыва воды в добывающую скважину. Для расчетов ВПГ в качестве ограничения, кроме обводненности, принята мольная доля кислорода в продукции скважины выше 1% (при достижении указанного значения соединение скважины с самым большим количеством кислорода в продукции закрывалось и счет продолжался дальше) и газонефтяной фактор более 5000 м^3/м^3. Это обусловлено необходимостью обеспечения безопасности работ и эффективного использования кислорода [13, 15]. При расчетах установлено, что максимальная пластовая температура не превышает 930 ^{0}С, а максимальное пластовое давление – 150 атм. Для всех расчетов с закачкой воздуха принято, что закачивается обогащенная смесь, состоящая из 40% кислорода и 60% азота. При развитии процесса ВПГ и увеличении поверхности фронта горения возрастает потребление кислорода, в результате чего горение начинает затухать и температура фронта падает [1]. Существует два способа решения этой проблемы – увеличение скорости закачки воздуха и повышение содержания кислорода в закачиваемом газе. Последнее более эффективно [1].

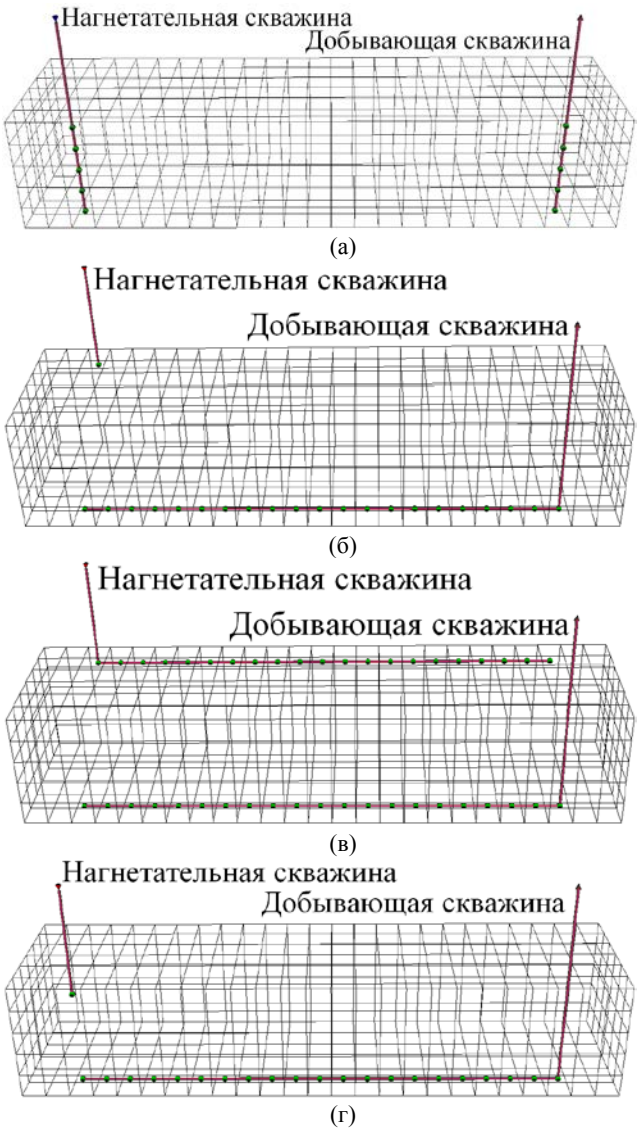


Рис. 3. Расстановка скважин на расчетной сетке для вариантов разработки; (а) – вар. 1-4, (б) – вар. 5, (в) – вар. 6, (г) – вар. 7. Изображение по оси Z увеличено в 3 раза. Точками обозначены скважинные ячейки, в которых проведена перфорация

Максимальный срок разработки принят равным 30 годам. В большинстве вариантов разработка закончена до истечения 30 лет (360 месяцев). При закачке воды нефтеотдача за 30 лет (360 месяцев) не превышает 18,2% при обводненности продукции на конец срока разработки 94%. При ВПГ нефтеотдача может составлять от 19,1% до 37,5% при сроке разработки от 72 до 180 месяцев в зависимости от режимов работы скважин, их расстановки и конструкции. Изменение нефтеотдачи во времени для различных вариантов разработки показано на рис. 4. Закачка воздуха по всей мощности пласта с отбором также по всей мощности

(классический вариант ВПГ – вар. 3) увеличивает коэффициент извлечения нефти (КИН) в 1,2 раза и уменьшает срок разработки в 2 раза по сравнению с заводнением. Технология направленной закачки воздуха (ее разновидность THAI) при правильной расстановке скважин и удачном подборе режимов их работы может увеличить нефтеотдачу в 2 раза по сравнению с классическим ВПГ и в 2,2 раза по сравнению с заводнением, также она позволяет сократить срок разработки в 2 раза по сравнению с классическим ВПГ и соответственно в 4 раза по сравнению с заводнением. По результатам расчетов наиболее технологически выгодным признан вариант 5 с направленной закачкой воздуха (см. табл. 3), который позволяет достичь нефтеотдачи 37,5% за 96 месяцев. Этот вариант предусматривает бурение вертикальной нагнетательной скважины с перфорацией в прикровельной части пласта и бурение горизонтальной добывающей скважины вдоль по пласту в подошвенной его части. На рис. 5, 6 представлены газо-нефтяной фактор, обводненность и мольная доля компонентов (кроме кислорода) для варианта 5. Осцилляции на графиках рис. 5, 6 вызваны в первую очередь периодическим подходом различных фронтов к добывающей скважине и отключением соединений при прорыве кислорода. Удельный расход воздуха для варианта 5 составляет 533 нм^3/м^3, кислородо-нефтяной фактор – 2 нм^3/м^3.

Рис. 4. Изменение нефтеотдачи во времени для различных вариантов разработки

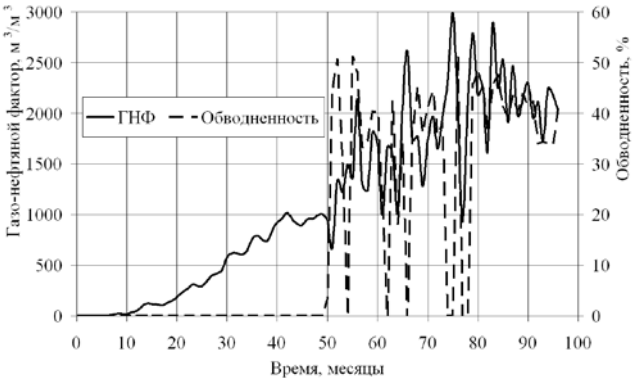


Рис. 5. Газо-нефтяной фактор (ГНФ) и обводненность для варианта 5

Таблица 3

Управляющие параметры и показатели разработки по вариантам расчета

Вариант	1	2	3	4	***5***	6	7
Закачиваемый агент	вода	вода	воздух	воздух	***воздух***	воздух	воздух
Схема расстановки скважин	Рис. 3 (а)	Рис. 3 (а)	Рис. 3 (а)	Рис. 3 (а)	Рис. 3 (б)	Рис. 3 (в)	Рис. 3 (г)
Закачка агента, м^3/сут в НУ	16	10	30000	22500	***30000***	30000	30000
Забойное давление на нагнетательной скважине, атм.	150	120	130	130	***130***	130	130
Забойное давление на добывающей скважине, атм.	90	80	90	97	***97***	97	97
Обводненность на конец срока разработки, %	94	86	51	42	***41***	49	29
Газо-нефтяной фактор на конец срока разработки, м^3/м^3	-	-	2874	2345	***2029***	2055	1963
Срок разработки, месяцы	360	360	180	72	***96***	89	88
КИН, д.ед.	0.182	0.139	0.191	0.226	***0.375***	0.324	0.271

Рис. 6. Мольное содержание компонентов (кроме кислорода) в продукции скважины для варианта 5

3. Заключение

В настоящей работе рассмотрена математическая модель многофазной многокомпонентной неизотермической фильтрации с химическими реакциями, позволяющая описывать процесс внутрипластового горения.

Изучена технологическая эффективность применения различных систем расстановки скважин при реализации метода направленной закачки воздуха.

Показано, что использование метода направленной закачки воздуха (в частности его разновидности THAI – закачки воздуха от «носка» горизонтальной скважины к «пятке») позволяет существенно (в 1,5-2,0 раза) интенсифицировать процесс добычи нефти по сравнению с заводнением и классическим сухим ВПГ.

Показано, что использование метода направленной закачки воздуха позволяет существенно (в 1,5-2,0 раза) увеличить нефтеотдачу по сравнению с заводнением и классическим сухим ВПГ.

Установлено, что большое влияние на эффективность применения метода направленной закачки воздуха оказывает расположение скважин, расположение интервалов перфорации и режимы работы скважин.

Application of numerical modeling for justification of technological effectiveness increase of Toe-to-Heel Air Injection

S.G. Volpin, R.M. Katz, I.V. Afanaskin

Abstract. Provided an overview of multiphase multicomponent non-isotermical filtration mathematical model which includes chemical reactions during air injection in oil reservoir. Numerical modeling applied for research of technological effectiveness for different production and injection wells location during viscous oil fields development by Toe-to-Heel Air Injection. Explores new options for placement of wells, allowing to increase the effectiveness of the studied method mining high-viscosity oil production.

Keywords: thermodynamic modeling, oil reservoirs, hole.

Литература

1. J. Ruiz, J. Rojaz THAI Toe-to-Heel Air Injection – Numerical simulation of THAI heavy oil recovery process // SPE 129215, 2007. – 6 p.
2. Ж. Бурже, П. Сурио, М. Комбарну Термические методы повышения нефтеотдачи пластов. М.: Недра, 1989. – 422 с.
3. Методические указания по созданию постоянно действующих геолого-технологических моделей нефтяных и газонефтяных месторождений (Часть 2. Фильтрационные модели). – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2003. – 228 с.
4. K.H. Coats In-situ combustion model // Soc. Pet. Eng. J., Dec, 1980. – P. 533-549.

5. Б.В. Алексеев, А.М. Гришин Физическая газодинамика реагирующих сред. М.: Высшая школа, 1985. – 464 с.

6. Л.Н. Хитрин Физика горения и взрыва. М.: Изд-во МГУ, 1957. – 452 с.

7. Э.Б. Чекалюк Термодинамика нефтяного пласта. М.: Недра, 1965. – 240 с.

8. H.B. Crookston, W.E. Culham, W.H. Chen Numerical simulation model for thermal recovery processes // Soc. Per. Eng. J., Feb., 1979. – P. 37-58.

9. В.Е. Борисов, Б.В. Кристкий, Н.А. Марченко и др. Композиционная неизотермическая модель фильтрации в пористой среде с учетом химических реакций и активной твердой фазы // Препринты ИПМ им М.В. Келдыша, № 91, 2013. – 32 с.

10. B.S. Gottfried A mathematical model of thermal oil recovery in linear systems // SPE Production Research Symposium in Tulsa, Okla., 3-4 May, 1965. – P. 20-35.

11. P.K.W. Vinsome, J. Westerveld A simple method for predicting cap and base rock heat losses in thermal reservoir simulators // The Journal of Canadian Petroleum Technology, (Montreal), July-September 1980. - P. 87-90.

12. ECLIPSE reservoir simulation software. Version 2011.2. Technical description. Schlumberger, 2011. – 1816 p.

13. И.В. Афанаскин, С.Г. Вольпин, Р.М. Кац Обоснование ограничения по мольной доле кислорода в продукции скважины и температуры закачиваемого воздуха при реализации метода направленной закачки воздуха // Эффективность разработки нефтяных месторождений и повышение нефтеотдачи пластов. – М.: ОАО «Всерос. нефтегаз. науч.-исслед. ин-т», № 145, 2012. - С. 68-85.

14. И.Д. Амелин Внутрипластовое горение. М.: Недра, 1980. – 230 с.

15. РД 39-9-191-79 Методическое руководство по проектированию и применению внутрипластового горения в разработке нефтяных месторождений. – М.: ОНТИ ВНИИ, 1979. - 172 с.

Развитие методов гидродинамических исследований нефтяных пластов и скважин

П.В. Крыганов[1], С.Г. Вольпин[1], А.В. Свалов, И.В. Афанаскин[1], Ю.М. Штейнберг

1 - кандидат технических наук

Аннотация: Описываются задачи, решаемые с помощью гидродинамических исследований пластов и скважин в рамках информационного обеспечения при проектировании, гидродинамическом моделировании, контроле и управлении процессами разработки нефтяных месторождений. Представлено развитие методов гидродинамических исследований нефтяных пластов и скважин с момента их зарождения до настоящего времени. Рассмотрена перспектива их применения для реализации проекта «интеллектуальные скважины и месторождения», при котором необходимо создать программно-аппаратный комплекс, включающий в себя постоянно-действующую геолого-термогидродинамическую модель месторождения, непрерывно обновляемую за счёт постоянного поступления новой информации о пласте и скважинах с использованием суперкомпьютерных технологий.

Ключевые слова: гидродинамические исследования, нефтяные пласты и скважины, контроль и управление

Введение

Под промысловыми гидродинамическими исследованиями понимается совокупность технологических операций по возбуждению пласта путем отбора из него пластовой жидкости или путем закачки в него жидкости, и проведение соответствующих замеров дебита и давления на возмущающей и наблюдательных скважинах [1].

Гидродинамические исследования пластов и скважин (ГДИ) являются важным источником информации, необходимой при проектировании, гидродинамическом моделировании, контроле и управлении процессами разработки нефтяных месторождений.

Гидродинамические исследования пластов подразделяются на две группы.

Первая группа основана на анализе процессов стационарной фильтрации в пласте. Плоскорадиальный стационарный приток к скважине описывается формулой Дюпюи:

$$q = \frac{2\pi kh}{\mu}\frac{\left(p_{пл} - p_{заб}\right)}{\left(\ln\frac{R_к}{r_c} + S\right)}, \qquad (1)$$

где q - дебит скважины в поверхностных условиях; k - проницаемость пласта; h - толщина пласта; μ - вязкость жидкости; $p_{пл}$ - пластовое давления (на контуре питания); $p_{заб}$ - забойное давление; $R_к$ - радиус контура питания; r_c - радиус скважины; S - скин-фактор (параметр, характеризующий изменение фильтрационных свойств околоскважинной зоны пласта по сравнению с удаленной зоной).

Формулу (1) можно переписать в следующем виде:

$$q = K_{пр}\left(p_{пл} - p_{заб}\right), \qquad (2)$$

$$K_{пр} = \frac{2\pi kh}{\mu}\frac{1}{\left(\ln\frac{R_к}{r_c} + S\right)},$$

где $K_{пр}$ - коэффициент продуктивности скважины – параметр, зависящий от фильтрационных параметров пласта и состояния околоскважинной зоны пласта. Он характеризует добывные характеристики данной скважины.

На анализе процессов стационарной фильтрации основан метод «установившихся» отборов. Сущность его состоит в получении значений «дебит q - забойное давление $p_{заб}$» при отборе жидкости из пласта на нескольких установившихся режимах работы скважины и построении кривой $q = f(p_{заб})$, которая называется индикаторной диаграммой данной скважины. В случае линейного закона фильтрации (1), (2) индикаторная диаграмма имеет вид прямой линии, рис. 1. Искомый коэффициент продуктивности скважины численно равен угловому коэффициенту этой прямой.

В зависимости от особенностей строения пласта, свойств нефти и термогидродинамических условий в пласте закон стационарной фильтрации флюидов в пласте может отличаться от линейного. В таком случае добывные характеристики скважин будут характеризоваться другими параметрами.

Вторая группа методов гидродинамических исследований пластов и скважин основана на анализе процессов нестационарной фильтрации. К этой группе относятся метод восстановления давления и метод гидропрослушивания скважин. Оба метода основаны на регистрации во времени изменения давления в одной скважине или нескольких после остановки или пуска в работу её или нескольких.

При проведении гидродинамических исследований нефтегазоводоносных пластов необходимо решать две задачи.

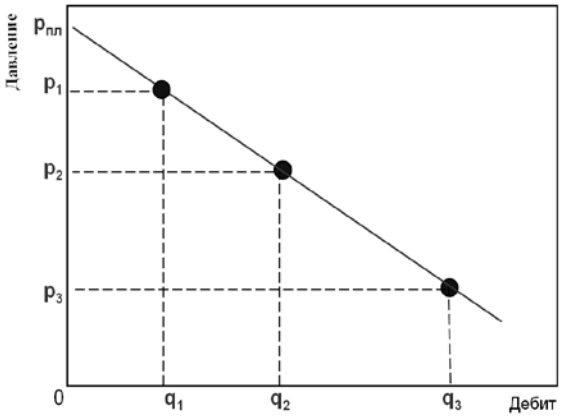


Рис. 1. Индикаторная диаграмма при линейном законе фильтрации

1. Прямая задача подземной гидродинамики состоит в определении давления p на момент времени t в произвольной точке пласта с известными коллекторскими и геометрическими параметрами при работе возмущающей скважины с дебитом q, изменяющимся по заданному закону или с заданным на скважине переменным давлением.

2. Обратная задача подземной гидродинамики состоит в определении коллекторских и геометрических параметров пластов по кривым изменения во времени дебита и давления, замеренным при исследованиях.

Решение этих двух задач осуществляется с помощью формул подземной гидродинамики, связывающих давление, дебит и параметры пласта. Вид расчетных формул, степень их сложности зависят, во-первых, от того, какой математической моделью аппроксимируется реальный неоднородный по коллекторским свойствам пласт со сложным геологическим строением, и, во-вторых, от того, какой аналитической кривой аппроксимируется фактический график дебита возмущающей скважины.

В неограниченном горизонтальном пласте с толщиной h в момент времени $t = 0$ пущена в работу скважина с постоянным дебитом q. В пласте возникает неустановившийся приток упругой жидкости к скважине. Давление в пласте в произвольной точке, удалённой от скважины на расстояние r в любой момент времени t определяется интегрированием уравнения пьезопроводности (3) (аналога уравнения теплопроводности), записанного для радиального притока в полярной системе координат.

$$\frac{\partial p}{\partial t} = æ\left(\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial r}\right) \qquad (3)$$

Начальные и граничные условия задачи следующие:

$$p(r,t) = p_{пл} \text{ при } t = 0;$$

$$p(r,t) = p_{пл} \text{ при } t > 0 \text{ и } r \to \infty \qquad (4)$$

$$q = \frac{2\pi kh}{\mu}\left(r\frac{\partial p}{\partial r}\right)_{r=0} \text{ при } r = 0,\ t > 0,$$

где æ – коэффициент пьезопроводности пласта (по аналогии с коэффициентом теплопроводности).

Пластовое давление согласно условиям (4) существует в пласте до начала пуска скважины в работу, а во время её работы - на большом удалении от скважины.

Решение уравнения пьезопроводности (3) для давления в любой точке плоскорадиального потока в условиях упругого режима фильтрации определяется по формуле:

$$p(r,t) = p_{пл} - \frac{q\mu}{4\pi kh}\left[-Ei\left(-\frac{r^2}{4æt}\right)\right], \qquad (5)$$

где $Ei(x)$ – интегральная экспоненциальная функция.

Если давление рассчитывается на стенке самой скважины, то при $r = r_c = 0.1$м аргумент интегральной экспоненциальной функции становится менее 0.01, при этом сама функция обращается в логарифмическую. Уравнение (5) в этом случае примет вид:

$$p(r_c,t) = p_{пл} - \frac{q\mu}{4\pi kh}\ln\left(\frac{2.246\,æt}{r_c e^{-2S}}\right) \qquad (6)$$

Помимо фильтрационных параметров гидродинамические исследования позволяют определять геометрические параметры пласта, характеризующие его строение и включающие следующие характеристики:

- размеры зон неоднородности;
- длина трещины;
- расстояния до границ и т.д.

Проследим, как происходило развитие методов обработки данных гидродинамических исследований нефтяных пластов и скважин на разных этапах развития.

1. Прямолинейная анаморфоза

На этапе зарождения и начала развития гидродинамических исследований (30-е и 40-е гг. XX века), как одного из основных источников информации о пласте, могли быть решены только простейшие случаи. Например, решение для фильтрации однофазной малосжимаемой жидкости в однородном бесконечном пласте. Интерпретация материалов исследований методом восстановления давления сводилась к построению прямолинейной анаморфозы кривой восстановления забойного давления (КВД) или уровня, т.е. построение графика в координатах модифицированное давление - модифицированное время; и дальнейшему выбору на этом графике прямолинейного участка и определению по наклону и свободному члену фильтрационных параметров пласта.

При интерпретации кривых восстановления давления, которые описываются уравнением (6), по данным промысловых измерений строится график в координатах $\ln t$ - Δp. На графике выделяется конечный прямолинейный участок, рис. 2, через точки которого проводится осредненная прямая линия, по которой определяются следующие комплексные параметры:

- коэффициент гидропроводности пласта

$$\frac{kh}{\mu} = \frac{q}{4\pi i},$$

- комплексный параметр

$$\frac{æ}{r_{np}^2} = \frac{æ}{r_c^2 e^{2S}} = 0.445 e^{A/i},$$

где i = tgα – тангенс угла наклона прямой линии к оси ln$t$; A – отрезок на оси Δp, отсекаемый прямой линией.

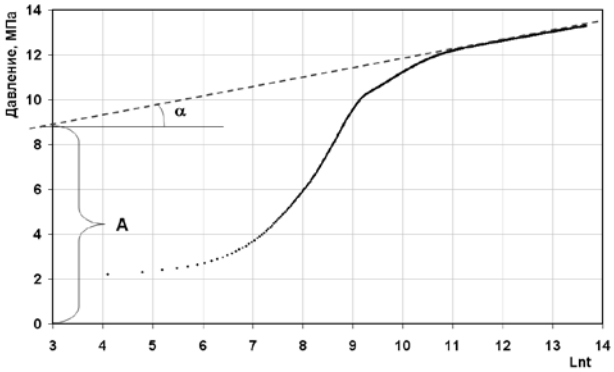


Рис. 2. – Обработка КВД в полулогарифмических координатах

Для получения из комплексных параметров отдельных составляющих (проницаемости, пьезопроводности) требуются результаты ГИС и лабораторных исследований керна и флюидов. При известных эффективной нефтенасыщенной толщине пласта, вязкости пластового флюида, коэффициентах сжимаемости пористой среды и жидкости по материалам исследований методом восстановления давления можно определить следующие параметры:

- коэффициент проницаемости k;
- приведённый радиус скважины $r_{c\,пр}$;
- скин-фактор $S = \ln(r_c / r_{c\,пр})$;
- пластовое давление $P_{пл}$;
- коэффициент пьезопроводности пласта æ [2]

$$æ = \frac{k}{\mu(m\beta_ж + \beta_c)},$$

где β_c и $\beta_ж$ - коэффициенты сжимаемости породы и жидкости; m - пористость.

Следует отметить две основные причины, по которым на этапе начала развития ГДИ количество моделей фильтрации было очень ограничено:

1. использовались манометры с часовым приводом и местной записью на бланке, поэтому вследствие небольшого времени завода часовых механизмов продолжительность записи кривых восстановления давления не превышала 12-ти часов;
2. не было реально доступного для представителей промысловых служб способа интерпретировать материалы ГДИ, используя более сложные модели (чем однородный бесконечный пласт), развиваемые научными организациями.

2. Типовые кривые

Первый качественный скачок в интерпретации результатов ГДИ был связан с появлением вычислительной техники (ЭВМ). С её появлением появилась возможность обработки результатов исследований эталонных (или типовых) кривых. ЭВМ позволила обрабатывать кривые (определенных параметров и в определенных координатах) и позволила получать решения для более сложных моделей в явном виде. Далее производилось совмещение типовых и фактических кривых. Существенными ограничениями использования типовых кривых являлось то, что они строились с определенным шагом и то, что применялся ручной метод наилучшего совмещения [3]. Поэтому такой способ определения фильтрационных параметров был достаточно грубым.

3. Диагностические графики и программы интерпретации

Следующий рывок произошел из-за технического прорыва, который сопровождался появлением высокоточных манометров [4] и появления ПК. Появилась возможность использовать более сложные модели, например с границами.

В 1982-1983гг. произошёл скачок в области ГДИ, который произвел Д. Бурде [5]. Он разработал алгоритм, который позволил существенно увеличить информативность кривых восстановления давления и достоверность определяемых параметров.

Суть этого алгоритма заключается в том, что по КВД строится диагностический график, который представляет собой семейство двух кривых. Одна кривая – изменение забойного давления во время КВД, а вторая кривая – это изменение во времени производной давления. Аргументом, по которому производится дифференцирование кривой давления, является функция суперпозиции, учитывающая историю работы скважины. Диагностический график строится в билогарифмических координатах с учетом истории работы скважины. Форма диагностического графика позволяет определить интерпретационную модель, которая определяется типом коллектора, наличием площадной неоднородности коллектора, непроницаемых границ, условиями притока к стволу скважины, характером фильтрации и др. По горизонтальному участку производной, соответствующему радиальной фильтрации в пласте, определяется гидропроводность пласта.

Однако в момент появления этого алгоритма исходных материалов, полученных с применением новых высокочувствительных манометров, было еще немного. По мере поступления исходных данных, дальнейшего их анализа начали появляться более сложные модели и интересные программные продукты. Все эти достижения позволили произвести серьезный прорыв, связанный с методом наилучшего совмещения (или методом нелинейной регрессии). Появилась возможность значительно увеличить

количество (от 3 до 8) определяемых параметров модели (коэффициентов нелинейной регрессии) в зависимости от ее сложности.

Примером таких программных продуктов в настоящее время являются зарубежные пакеты - WELTEST компании ECL Petroleum Technologies, пакет Interpret/2 компании Scientific Software-Intercomp, пакет Saphir компании KAPPA Engineering (рис. 3), пакет Zodiac компании Schlumberger, пакет PanSystem компании EPS PanSystem и ряд других. Часть этих программ используется в России. Стоимость таких программ достаточно высока.

Среди отечественных программ для обработки материалов ГДИ следует выделить следующие: «TestAR» (ЗАО «ЦГДИ Информпласт») [6], «Гидратест» (РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина) [7], «Интерпретатор–М» (НИПИморнефть), «ГДИ-эффект» (ОАО ЦГЭ Москва), «ГДИ» (IMS Corporations), программа для интерпретации ГДИ (ЮганскНИПИНефть Уфимский филиал), «ГИДРОЗОНД» (ГеоТЭК). Некоторые отечественные нефтедобывающие компании используют свои собственные программы для обработки материалов промысловых гидродинамических исследований. Как правило, эти программы содержат ограниченный набор методов и моделей, отвечающих специфическим условиям данной компании.

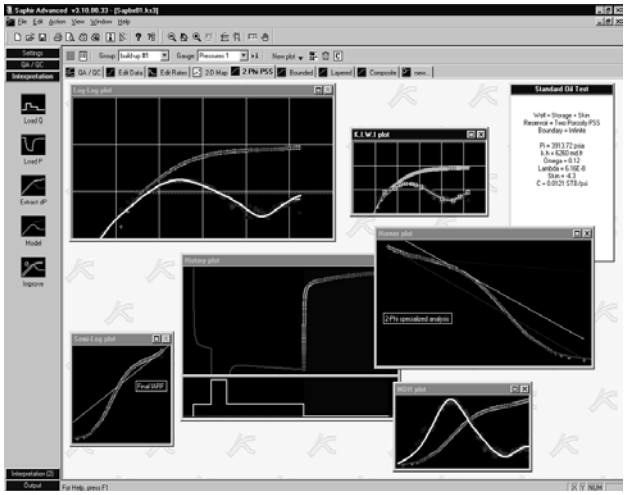


Рис. 3. Программа интерпретации материалом ГДИ Saphir (ПК «Ecrin»)

4. Комплексирование аналитических и численных решений

С появлением мощных ПК у специалистов появилась возможность при интерпретации результатов гидродинамических исследований в проверочных целях производить численное гидродинамическое моделирование на сеточных моделях, используя метод конечных разностей на сетке угловой точки (Eclipse Schlumberger) или метод конечных элементов на сетке Вороного (Saphir, Rubis Kappa Engineering, рис. 4).

Использование численного моделирования при интерпретации результатов ГДИ имеет следующие преимущества:

1. Возможность построения фильтрационных моделей района проведения ГДИ с целью оперативного уточнения строения пласта.
2. Возможность моделирование сложных ГДИ с целью уменьшения неопределенностей результатов интерпретации исследований.
3. Возможность оперативной проверки гипотез о геологическом строении пласта на основе создания секторных фильтрационных моделей по результатам исследований скважин (ГИС, ГДИ, ПГИ).
4. Еще одним преимуществом является то, что при численном моделировании можно достичь лучшего совмещения, нежели в случае аналитического решения.

Аналитические решения получены для наиболее актуальных моделей, однако при их получении принимается ряд допущений (предположений). Численное моделирование позволяет рассчитывать более сложные задачи, которые значительно ближе к реальным. Этот путь представляется более перспективным, но он связан с определенными трудностями (большие затраты времени на вычисления, большое количество параметров моделей и пр.).

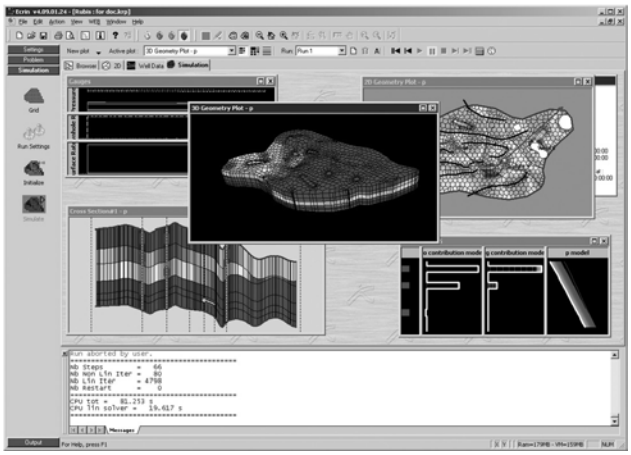


Рис. 4. Программа для гидродинамического моделирования фильтрации нефти, газа и воды в пласте в системе скважин Rubis (ПК «Ecrin»)

При использовании численных гидродинамических моделей появляется возможность комплексного анализа результатов различных видов исследований и их сопоставления, анализа влияния различных факторов на результаты исследований.

5. Альтернативные методы обработки исследований – анализ длительных кривых и деконволюция

В последние годы для исследования скважин, наряду с традиционными ГДИ, все чаще применяются альтернативные методы исследований, включающие внедрение систем перманентного скважинного контроля.

Для качественной разработки месторождения требуется построение корректной модели на основе большого объема данных многочисленных исследований. Вместе с тем, проведение традиционных ГДИ связано с определенными проблемами, такими как потери в добыче, вызванные остановкой скважин, существенные затраты на проведение инструментальных замеров и большая длительность исследований в низкопроницаемых коллекторах. Обойти эти проблемы можно оснастив скважины приборами, обеспечивающими передачу информации на поверхность по кабелю.

В частности, внедрение термоманометрических систем (ТМС) в скважинах, оборудованных электроцентробежными насосами, позволяет осуществлять непрерывную длительную регистрацию и передачу на поверхность по кабелю текущих значений забойного давления. При наличии информации об изменении забойного давления и дебита в течение длительного времени и соответствующего программного продукта (Topaz, Kappa) можно выполнить интерпретацию этих данных и получить фильтрационно-емкостные свойства пласта (проницаемость, скин-фактор, радиус дренирования, размеры залежи); дать прогноз того, как будет меняться продуктивность залежи в будущем; выявить момент начала влияния соседней скважины, а также провести анализ накопленного объема добычи с начала эксплуатации скважины.

При оборудовании электроцентробежных насосов стационарными датчиками давления любые технологические остановки скважин используются в качестве гидродинамических исследований для определения фильтрационно-емкостных параметров и пластового давления. При этом интерпретации подвергаются даже короткие недослеженные кривые, т.е. даже те кривые восстановления давления, на которых невозможно выделить участок радиальной фильтрации в виду малой длительности КВД. В некоторых случаях для продления КВД и «предсказания» расположения участка радиальной фильтрации на КВД в билогарифмических координатах используется метод деконволюции. С помощью этого метода можно преобразовать сложную зашумленную кривую истории добычи с участками восстановления давления в КВД, готовую для интерпретации. Суть метода деконволюции заключается в оптимизации. Вместо того чтобы оптимизировать параметры модели в процессе интерпретации КВД, дискретное представление производной, которую ищут, сдвигают и изгибают пока она не будет удовлетворять выбранным данным после интегрирования (чтобы получить отклик единичного давления от этой производной) и свертки (чтобы учесть дебиты). При этом для использования метода деконволюции необходимо задать пластовое давление, которое приближенно определяется по недослеженной КВД. В таком случае точность оценки пластового давления невелика, а само значение пластового давления сильно влияет на вид деконволюированной КВД.

6. Интеллектуальные скважины и месторождения

В связи с ростом доли трудноизвлекаемых запасов, возникла острая необходимость в применении новых технологий разработки месторождений углеводородов. Применение сложных технологий разработки месторождений с трудноизвлекаемыми запасами требует постоянного контроля за процессами разработки и оперативного принятия решений по управлению разработкой.

Для решения поставленных задач необходимо создать программно-аппаратный комплекс, включающий в себя постоянно-действующую геолого-термогидродинамическую модель месторождения, непрерывно обновляемую за счёт постоянного поступления новой информации о пласте и скважинах.

Программно-аппаратный комплекс, создаваемый на месторождении, предполагает постоянную работу следующих блоков:

1. Непрерывная регистрация изменения забойного давления, температуры, дебита, обводнённости, характеристик работы скважинного оборудования с помощью высокоточных датчиков.
2. Интерпретация кривых изменения забойного давления и дебита с целью мониторинга состояния призабойной зоны скважин и фильтрационно-емкостных характеристик пласта.
3. Создание и непрерывное обновление постоянно-действующей геолого-термогидродинамической модели месторождения за счёт постоянного поступления новой информации о пласте и скважинах.
4. Отработка на постоянно-действующей модели новых технологических решений по воздействию на пласт и призабойную зону, вводу-выводу скважин и т.д. Контроль и управление за процессами разработки месторождения.

Заключение

В сложных случаях (многослойные пласты с перетоком и без него, влияние границ сложной формы, сложный композитный пласт, учет неоднородности пласта по фильтрационно-емкостным свойствам, влияние окружающих скважин, многофазный поток, влияние газовой шапки и подошвенной воды, слабосцементированные пласты, отклонение от закона Дарси и пр.) процессы фильтрации описываются нелинейными дифференциальными уравнениями [8]. На данный момент это направление не достигло больших успехов при использовании существующих аналитических моделей, поскольку это затруднительно по причине слишком большого количества допущений в моделях и знания многих зависимостей свойств флюидов.

Учитывая современную скорость развития вычислительной техники и программных продуктов, специализированных для решения различных задач разработки нефтяных месторождений, наиболее

перспективным представляется развитие и использование численных методов для задач подземной гидромеханики в целом и для сложных случаев, в частности.

Использование суперкомпьютерных технологий позволяет оперативно интерпретировать материалы, содержащие большие массивы данных, использовать численные модели для комплексирования различных видов исследований для максимальной интеграции в модель результатов всех имеющихся исследований пласта, скважин и флюидов и сопоставление расчетных и фактических кривых фазовых дебитов скважин и забойных давлений.

Evolution of well testing methods

P.V. Kryganov, S.G. Volpin, A.V. Svalov, I.V. Afanaskin, Y.M. Shteynberg

Abstract. The tasks which are solved by well testing including information support application during the hydrodynamic simulation, monitoring and management over oil field development process have been described. Evolution of well testing methods from its beginnings to the present were considered. The possibility to apply methods in the framework of the project "Smart wells and fields" was reviewed, in which using supercomputing technologies it is necessary to create hardwore-software complex including permanent geological-thermohydrodynamical model which is continuously-updated through a continuous supply of reservoir and well data.

Keywords: hydrodynamic studies, oil reservoirs and wells, monitoring and control

Литература

1. Л.Г. Кульпин, Ю.А. Мясников Гидродинамические методы исследования нефтегазоводоносных пластов. М.: Недра, 1974, 200 с.
2. В. Н. Щелкачев Разработка нефтеводоносных пластов при упругом режиме. М.: Гостоптехиздат, 1959, 467 с.
3. Р. Эрлагер Гидродинамические методы исследования скважин. Перевод с англ. под ред. М. М. Хасанова. Москва - Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2006, 512 с.
4. А. С. Вольпин, А. К. Пономарев Обзор современных автономных глубинных манометров, используемых при исследованиях скважин // Нефтяное хозяйство. – №12, 2003. С. 57-59.
5. D. Bourdet et al. A new set of type curves simplifies well test analysis // World Oil. – May, 1983. P. 95–106.
6. С. Г. Вольпин, Ю. А. Мясников, Н. П. Ефимова и др. “TESTAR” – пакет программ для обработки материалов гидродинамических исследований нефтегазовых пластов // Нефтяное хозяйство. - №5, 2002. С. 58-60.
7. А. И. Ипатов, М. И. Кременецкий Геофизический и гидродинамический контроль разработки месторождений углеводородов. М.: НИЦ «Регулярная и хаотичная динамика», 2005, 780 с.
8. A.C. Gringarten Interpretation of Tests in Fissured and Multilayered Reservoirs with Double-Porosity Behavior: Theory and Practice // Pet. Tech. – April, 1984. P. 549-564.

Некоторые аспекты совершенствования германиевых технологий КМОП ИС

В. А. Горячев[1]

1-кандидат физико-математических наук

Аннотация: Для совершенствования КНИ КМОП микропроцессоров с низкой мощностью рассмотрены некоторые особенности применения германия в элементах объемных ИС. Даётся представление об усовершенствованиях в технологических процессах создания наноконструкций нитевидных нанокристал-лов кремния с гетеропереходами Ge-Si. Делается вывод о возможности производства Ge-Si КМОП ИС, совместимого с современными технологиями микроэлектроники.

Ключевые слова: германиевые технологии, процессоры, наноконструкции

Введение

Для проектирования высокопроизводительных КНИ КМОП микропроцессоров с низкой мощностью обычно рассматриваются германиевые (Ge) технологии микро- и наноконструкций планарных интегральных схем (ИС). Изучается специфика повышения скорости обработки данных и снижения энергозатрат при работе подобных ИС, которые создаются, как правило, в рамках изученных технологических процессов [1].

В последнее время в микро- и наноэлектронике находят применения вертикальные нанопроволоки или нановискеры (НВ) – нанокристаллы с отношением длина/диаметр 10 и более. Рост таких нитевидных кристаллов возможен на основе широкого круга материалов: металлов, керамик, полупроводников. Полупроводниковые НВ обладают уникальными электронными и оптическими свойствами, что делает возможным их применение в современных микро- и оптоэлектронных приборах. На основе вертикальных нитевидных кристаллов созданы полевые транзисторы [2]. Отдельные вертикальные Si нанокристаллы применяются как зонды для атомно-силовой микроскопии, а регулярные ансамбли используются в качестве полевых эмиттеров электронов и ионов.

Особый интерес представляют кремниевые и германий-кремниевые нановискеры в связи с возможностью создания наноэлектронных приборов на их основе, совместимых с традиционной кремниевой технологией. Использование гетероструктур кремний - германий позволяет улучшить приборные характеристики. Так, на германиевых вискерах, покрытых кремниевой оболочкой, создаются вертикальные транзисторы с более высокой подвижностью, а вискеры с аксиальной гетероструктурой Si-Ge пригодны для создания туннельных приборов. Si и Ge образуют непрерывный ряд твердых растворов замещения $Si_{i.x}Ge_x$, что позволяет выбирать физические свойства конструкционных материалов.

В зависимости от условий роста и используемых материалов НВ имеют различную морфологию: могут расти прямыми или искривленными, быть полыми, иметь ответвления [3].

Практический интерес представляют упорядоченные массивы прямых НВ с малым разбросом по размерам и полые НВ. Полые НВ обладают меньшей массой и большей площадью поверхности по сравнению со сплошными, что повышает их чувствительность как сенсоров массы [4]. Так как морфология может влиять на электронно-оптические и механические свойства НВ, то процессы роста интенсивно исследуются как экспериментально, так и теоретически.

Важным этапом создания электронных приборов на основе НВ является формирование p-n переходов и гетеропереходов (ГП). Создание аксиальных p-n переходов и гетеропереходов в НВ не требует дополнительных технологических операций в отличие от планарных структур, так как гетеропереходы формируются непосредственно в процессе роста.

1 Интегрированные транзисторы КМОП tri-gate

Чтобы размещать на кристалле все больше транзисторов, полупроводниковая промышленность продолжает внедрять технологические инновации, направленные на уменьшение размеров транзисторов. Однако, несмотря на развитие технологий, уменьшение размеров транзисторов становится все более проблематичным, в частности из-за ухудшения эффектов коротких каналов и возрастания паразитных утечек при уменьшении размеров затвора. Утечка как транзистора в закрытом состоянии (возрастающая при уменьшении размеров затвора), так и диэлектрика затвора (возрастающая при уменьшении толщины слоя диэлектрика) вызывает увеличение рассеиваемой мощности при масштабировании.

Для решения проблемы утечки транзисторов в 2002 году корпорация Intel разработала первый в мире транзистор КМОП tri-gate [5], в котором применялась не планарная, а трехмерная

конструкция затвора, позволяющая повысить управляющий ток и снизить ток утечки транзистора в закрытом состоянии. С тех пор компания Intel добилась улучшения эксплуатационных характеристик транзисторов и эффективности использования электроэнергии путем объединения конструкции tri-gate с другими кремниевыми производственными технологиями и инновационными материалами, включая напряженный кремний, диэлектрики затвора high-k, металлические электроды затвора и эпитаксиальные рельефные истоки/стоки. В результате был создан не планарный транзистор, который обеспечивает увеличение управляющего тока на 30% для транзисторов NMOП с электронной и на 60% для транзисторов PMOП с дырочной проводимостью по сравнению с оптимизированными передовыми 65-нм планарными транзисторами при том же уровне утечки в закрытом состоянии. Таким образом, новая конструкция КМОП транзисторов, использующая выход в третье измерение, позволяет значительно улучшить эксплуатационные характеристики основных элементов микропроцессора. Этот результат показывает, что преимущества различных полупроводниковых инноваций дополняют друг друга и их можно объединять, чтобы продолжать тенденции масштабирования и увеличения производительности КМОП транзисторов и ИС.

Новая архитектура транзистора tri-gate показана на рисунке 1. Этот транзистор может быть изготовлен как на подложке кремний на изоляторе (КНИ), так и на стандартной подложке из кристаллического кремния. В нем применяются один электрод затвора в верхней части канала и два электрода затвора по бокам канала. Транзистор с верхним затвором имеет физическую длину затвора L_G и физическую ширину затвора W_{Si}, а транзистор с боковым затвором - физическую длину затвора L_G и физическую ширину затвора H_{Si} (рис. 1).

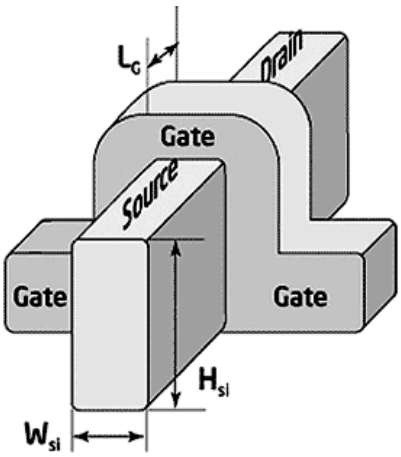


Рис. 1. В транзисторе Intel tri-gate затворы окружают кремниевый канал с трех или четырех сторон

Вообще, электростатика, а следовательно и производительность короткого канала транзистора tri-gate, определяются отношением фактического значения L_G к фактическому значению W_{Si}. Масштабирование W_{Si} обеспечивает дополнительное улучшение электростатики транзистора совместно с масштабированием L_G, а также с масштабированием перехода исток/сток и диэлектрика затвора. Общий групповой управляющий ток транзистора равен сумме управляющих токов транзистора с верхним затвором и двух транзисторов с боковыми затворами, или $2H_{Si} + W_{Si}$. Таким образом, чем выше транзистор, тем больше общий групповой управляющий ток.

2 Технологические особенности создания напряженных полиструктур

Технология создания напряженных структур используется при изготовлении транзисторов NMOП и PMOП по 90-нм и 65-нм техпроцессам для улучшения их эксплуатационных характеристик. Эта же технология применяется и для непланарной архитектуры tri-gate. Технология создания напряжений позволяет увеличить подвижность как электронов, так и дырок и повышает скорость переключения транзисторов КМОП. Усовершенствование конструкций планарной и не планарной архитектуры может включать объединение инноваций, таких например, как применение диэлектриков с высокой диэлектрической постоянной k, обеднение каналов, двойная эпитаксиальная структура истока/стока и др.

2.1 Затвор High-k/metal

В транзисторах NMOП и PMOП tri-gate для изготовления диэлектрического слоя затвора используется материал с высоким значением диэлектрической постоянной k (high-k) вместо традиционного диэлектрика из диоксида кремния. А электроды затвора вместо традиционного поликристаллического кремния изготавливаются из металла. Применение затвора high-k/metal позволяет снизить утечку диэлектрика затвора по сравнению со стандартным затвором из диоксида кремния/поликристаллического кремния. Использование металлических электродов устраняет истощение поликристаллического кремния и улучшает эксплуатационные характеристики транзисторов. Кроме того, применение металлических электродов с работой выхода, близкой к середине ширины запрещенной энергетической зоны, позволяет снизить концентрацию примесей в подложке, что повышает подвижность в канале, а следовательно, улучшает производительность и общие эксплуатационные характеристики транзисторов.

2.2 Двойная эпитаксиальная рельефная структура истока/стока

В комплексных транзисторах КМОП tri-gate используется уникальная рельефная структура истока/стока, построенная с помощью эпитаксиального нанесения кремния для транзисторов NMOП и кремния-германия для транзисторов PMOП. Области истока и стока возвышаются над плоскостью поверхности соединения затвора с подложкой из оксида кремния. Это позволяет снизить паразитное сопротивление и также улучшает характеристики транзистора.

Корпорация Intel изготовила прототипы комплексных транзисторов КМОП tri-gate как на подложках КНИ, так и на подложках из кристаллического кремния. Транзисторы tri-gate на подложке из кристаллического кремния и на КНИ подложке демонстрируют эквивалентные возможности масштабирования и производительность короткого канала, а также величину управляющего тока.

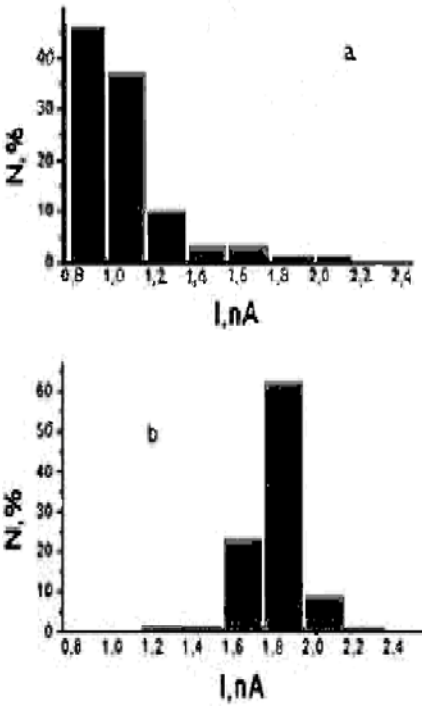
3 Утечка в легированных слоях кремния

Одна из основных проблем, характерная для КМОП-структур, связана с возможностью возникновения в них нежелательного механизма проводимости, известного под названием «защелкивания» или тиристорного эффекта [6]. Суть его заключается в том, что КМОП-структуры представляют собой тиристорную структуру n-p-n-p-типа, способную срабатывать при инжекции неосновных носителей заряда в базу биполярных транзисторов, составляющих тиристор. Инжекция может возникнуть из-за внутренних или внешних помех на выводах микросхемы, либо при спецвоздействиях.

Эффективным методом подавления «защелкивания» является использование для изготовления приборов эпитаксиальных пленок на низкоомной подложке, которая является шунтом базы. Однако качество эпитаксиальных слоев (ЭС) существенно уступает качеству монокристалллических подложек. Плотность дислокаций в слое обычно превышает плотность дислокаций в подложке. Она возрастает в направлении от поверхности эпитаксиального слоя к границе раздела слоя с подложкой. Кроме того, механические напряжения возникают и при значительном различии в содержании легирующей примеси в подложке и эпи-слое. В процессе наращивания эпитаксиального слоя из-за различия в параметрах решетки подложки и слоя возникают напряжения и структура деформируется.

В работе [7] Ge вводился в эпитаксиальные слои в процессе низкотемпературной хлоридной эпитаксии в системе Hh+SiCU+GeCU (кремний, легированный изовалентной примесью). Концентрации германия N_{Ge} варьировались в широких пределах: от нелегированного Si с естественной примесью Ge (N_{Ge} ~ 3.10^{1} см$^{-3}$) до максимального уровня легирования Si-Ge (N_{Ge} ~ 2.10^{20} см$^{-3}$). На полученных по стандартной промышленной технологии эпитаксиальных слоях в заводских условиях формировались p-n переходы и МОП-структуры, являющиеся составными элементами комплиментарных МОП-транзисторов. Слои имели удельное сопротивление от 0.5 до 9.0 Ом.см и толщину 7-15 мкм.

На рисунках 2 a) b) c) d) и e) представлены результаты измерения токов (в наноамперах) утечки p-n переходов, сформированных на исследуемых структурах. Видно, что использование эпитаксиальных пленок (рис.2b) приводит к увеличению токов утечки примерно в полтора раза по сравнению с p-n-переходами, сформированными на монокристаллах. Легирование эпитаксиальных слоев атомами германия позволяет снизить токи утечки и при концентрации Ge около 5.0×10^{19} см$^{-3}$ (рис.2d) гистограмма распределения по величине тока утечки аналогична гистограмме для пластин без эпитаксиального слоя (рис.2a). Дальнейший рост концентрации германия (рис.2e) приводит к ухудшению (или увеличению дефектности) параметров p-n перехода.



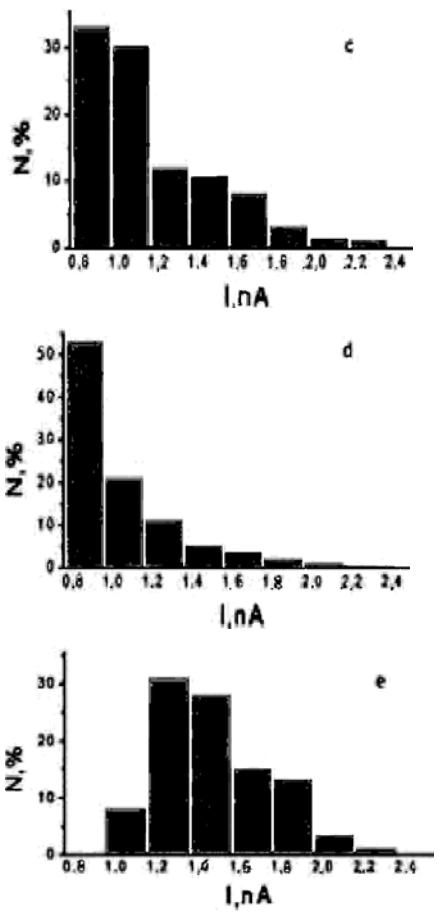


Рис.2. Гистограммы токов утечки p-n переходов, заимствованные из работы [7]

Одним из наиболее важных требований, предъявляемых к МОП-структурам является качество формирования окисла, который должен обладать высокой механической и электрической прочностью (устойчивость в электрических полях до 10 В/см), минимальной величиной дефектности и высокой стабильностью зарядов как во внутреннем объеме, так и на границе раздела. На рисунке 3 представлены результаты исследований влияния Ge на дефектность подзатворного диэлектрика МОП-структур.

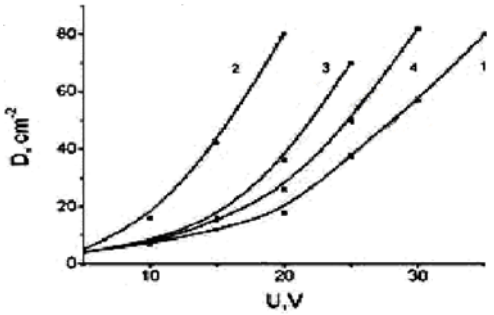


Рис. 3. Зависимость плотности дефектов D подзатворного диэлектрика от приложенного напряжения U для Si-Si0_2-polySi структур, сформированных на монокристаллах (1) и на эпитаксиальных слоях, легированных Ge (2, 3, 4) с различной плотностью N_{Ge}: 2 - 0, 3 - 2×10^{19}см$^{-3}$, 4 - 5×10^{19} см$^{-3}$.

Плотность дефектов (D) определялась из выражения

D(U) = lnP/S, (см$^{-2}$),

где S = 0,2 см^2 площадь структуры, P вероятность того, что структура не пробивается при приложении к ней напряжения U.

При $U_{пр}$ = 10 В плотность дефектов D составляла: 0.33 см$^{-2}$ для стандартных пластин типа КЭС-0.01; 1.00 см$^{-2}$ для специально обедненных (нелегированных германием) эпитаксиальных пленок и 0.34 см$^{-2}$ для ЭС, легированных Ge в концентрации 5.0×10^{19} см$^{-3}$.

Легирование германием также приводило к увеличению пробивных напряжений МОП-структур, сформированных на эпитаксиальных пленках (рис. 4 b, c).

Таким образом можно заключить, что дефектность легированных германием эпитаксиальных пленок, сформированных на монокристаллических подложках, при N_{Ge} ~ (2-5)10^{19} см$^{-3}$ существенно не отличается от дефектности самих монокристаллов.

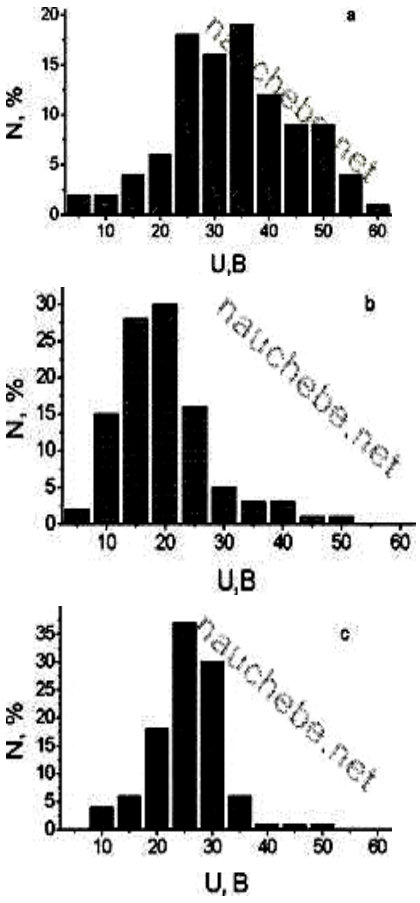


Рис. 4. Гистограммы распределения напряжений пробоя Si – SiC – поли-Si структур из [7], сформированных на: (a) монокристалле; (b) и (c) в эпитаксиальных слоях с плотностью германия N_{Ge} 2.10^{19} и 5.10^{19} см$^{-3}$ соответственно.

Кроме того, дополнительное легирование эпитаксиального слоя изовалентной примесью германия (Ge) позволило снизить величину токов утечки практически до значений, соответствующих p-n переходам, сформированным на монокристаллических подложках без эпитаксиального слоя. Дальнейшее увеличение концентрации германия до величин N_{Ge} ~ 1.10^{20} $см^{-3}$ приводило к возрастанию дефектности эпитаксиальных пленок и p-n переходов.

Полученные результаты объясняются тем, что ковалентный радиус атомов германия больше чем атомов кремния. Поэтому легирование эпитаксиальных пленок германием позволяет уменьшить степень несоответствия параметров решеток подложки и эпитаксиального слоя. Это, в свою очередь, приводит к снижению плотности дислокаций несоответствия и уменьшению напряжений на границе раздела подложка эпитаксиальный слой, что обуславливает снижение токов утечек и пробивных напряжений МОП-структур, формируемых на эпитаксиальном слое. Кроме того, легирование германием приводит к увеличению полей пробоя $Si0_2$:Ge на 10-15% и подавлению явления деградации оксида в сильных электрических полях [8].

Легирование германием в более высоких концентрациях приводит к увеличению периода решетки эпи-слоя по сравнению с подложкой, что вновь вызывает формирование дислокаций несоответствия и ухудшает эксплуатационные параметры создаваемых приборов. Оптимальной концентрацией германия для согласования параметров решеток монокристаллической подложки КЭС-0.01 и эпитаксиального слоя является N_{Ge} ~ $(2\text{-}5)10^{19}$ $см^{-3}$

Таким образом, приведенные выше результаты указывают на то, что введение германия в эпитаксиальные пленки в процессе газофазной эпитаксии с последующим формированием на них p-n-переходов и МОП-структур позволяет повысить их эксплуатационные параметры. Дефектность диэлектрика и напряжение пробоя МОП-структур, изготовленных на легированных Ge эпитаксиальных слоях, практически не отличаются от аналогичных параметров структур, сформированных на стандартных монокристаллических подложках. Легирование эпитаксиальных пленок германием позволяет также снизить величину токов утечки p-n-переходов до значений, характерных для приборов, созданных на монокристаллических подложках.

4 Переход индустрии на объемные ИС

Ведущие производственные или фаундри (foundries)-компании (название «фаундри» подчеркивает особую роль так называемого кристального производства (Silicon Foundry)) и компании, занимающиеся сборкой и тестированием ИС, приложившие немало усилий по разработке технологии сквозных межсоединений (TSV) при изготовлении ИС со структурой 3D, достигли значительного прогресса [9]. Благодаря такому прогрессу началось серийное производство объемных ИС по новой технологии в США, Китае, Израиле, др. странах. Тем не менее, многие заказчики и, главным образом, дизайн-центры по разработке ИС, на начальном этапе не могли применять эту технологию из-за нерешенных проблем в проектирования кристаллов. Лидирующие позиции в рассматриваемой сфере занимает тайваньская фаундри-компания TSMC (Тайваньская компания, занимающаяся изучением и производством полупроводниковых изделий, основанная в 1987 году правительством КНДР), которая еще в 2012 году освоила производство кристаллов 3D по технологии TSV и совместно с компанией Qualcomm приступила к разработке соответствующих изделий.

В начале 2013 года Globalfoundries объявили о выпуске чипов для мобильных и потребительских приложений, изготавливаемых по 3D-технологии с проектными нормами 20 нм. Чипы с вертикальными TSV соединениями, позволяют реализовать электрические соединения между несколькими кристаллами интегральных схем, расположенными один над другим. Такая многослойная трехмерная полупроводниковая структура обеспечивает значительное улучшение характеристик по энергопотреблению и пропускной способности для современных электронных устройств. Указанная технология рассматривается как альтернатива тенденции масштабирования традиционной планарной технологии изготовления ИС. Достижения специалистов Globalfoundries позволили приступить к производству чипов с TSV-межсоединениями на нью-йоркской фабрике Fab 8, а также к сборке и тестированию изделий в сотрудничестве со сторонними организациями (Outsourced Semiconductor Assembly and Test, OSAT). После проведения испытаний Globalfoundries начала поставки тестовых трех-мерных чипов, чтобы предоставить заказчикам компании возможность адаптировать технологию под свои продукты. К важнейшему этапу реализации новой технологии относят создание САПР 3D интегральных схем в сентябре 2013 года компанией Cadence для технологии, освоенной компанией TSMC.

Some aspects of the improvement of germanium CMOS IC technology

V.A. Goryachev

Abstract: To improve the SOI CMOS microprocessor with low power use some features of germanium in bulk IC elements. Provides an overview of improvements in processes of creating nanostructures filamentary nanocrystals of silicon heterojunction Ge-Si. The conclusion about the possibility of production Ge-Si CMOS IC is compatible with modern technologies of microelectronics.

Keywords: germanium technology, processors, nanoconstructs

Литература

1. В.А. Горячев «Особенности германиевых технологий КМОП ИС» Труды НИИСИ РАН, том 3, № 1, 2013, стр. 78 – 82
2. Lugstein A. Scalable approach for vertical device integration of epitaxial nanowires / A. Lugstein, M. Steinmair, C. Henkel, E. Bertagnolli // Nano Lett. 2009. - Vol. 9, N 5. - P. 1830-1834.
3. Wu Zh. Charge separation via strain in silicon nanowires / Zh. Wu, J. B. Neaton, J. C. Grossman // Nano Lett. 2009. - Vol. 9, N 6. - P. 24182422.
4. Vo T. First principles simulations of the structural and electronic properties of silicon nanowires / T. Vo, A. J. Williamson, G. Galli // Phys. Rev. B. 2006. Vol. 74.-P. 045116-1-12
5. http://www.thg.ru/technews/20110504_223700.html (Компьютер Пресс 10'2006)
6. Технология СБИС. Ч.2./ Под ред. С. Зи М.: Мир, 1986.
7. Бринкевич Д. И., Просолович В. С., Янковский О. Н., Янковский Ю. Н. « Легированные германием эпитаксиальные слои кремния для СВЧ – интегральных микросхем» БГУ, Минск 220050, Беларусь. *10-я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 24-27 сентября 2013 г., Минск, Беларусь, секция 3, стр. 217- 219*.
8. Бринкевич Д. И., Просолович В. С., Янковский Ю. Н. Особенности захвата на ловушки и рассеяния носителей заряда в окислах на основе Si:Ge. Микроэлектроника, 2002, т. 31, № 4, стр. 299-302.
9. http://www.russianelectronics.ru/leader-r/news/snabworldmarket/doc/61892/ 26 февраля 2014 .

Численное решение уравнения Озейна, моделирующее обтекание кругового цилиндра

А.В. Горшков[1], С.Б. Родин

1 – кандидат физико-математических наук

Аннотация: В работе представлен результат моделирования внешнего потока, обтекающего круговой цилиндр. Дано описание численного решения внешней задачи Дирихле для уравнения Озейна в вихревой форме.

Ключевые слова: уравнение Озеена, численные методы гидродинамики, вихревая дорожка Кармана, обтекание цилиндра, прямые методы вычислений, неявные разностные схемы

1. Введение

Моделирование отрывного течения вокруг кругового цилиндра потоком жидкости является типовой задачей численной гидродинамики, допускающей множество подходов, решению которой посвящен обширный ряд работ (см. [1]-[4] и цитируемую там литературу).

В частности, при моделировании отрывных течений, применяют метод дискретных вихрей (см. [1]). Для цилиндрической области данное течение имеет характерный вид так называемой дорожки Кармана (см. Рис. 1).

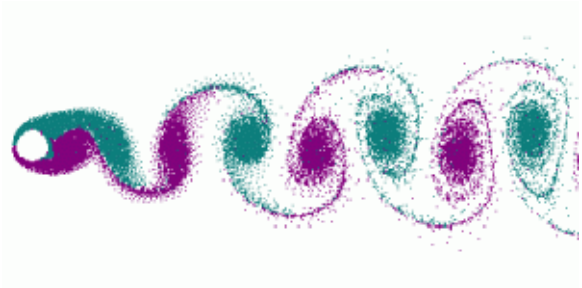


Рис. 1. Дорожка Кармана (Karman Vortex Street)

В данной работе предложен комбинированный метод, в котором дискретные вихри являются граничными условиями, замыкающими систему уравнений гидродинамики.

2. Постановка задачи

Во внешности цилиндра радиуса R, обтекаемого внешним потоком жидкости со скоростью v_∞, ищется векторное поле $\vec{v} = (v_1, v_2)$, $\vec{v} = \vec{v}(x_1, x_2)$,

удовлетворяющее линеаризованной системе Навье-Стокса. Граничное условие на бесконечности определяется внешним потоком: $\vec{v} \to (v_\infty, 0)$ при $|x| \to \infty$. Вместо стандартного условия прилипания $\vec{v}\big|_{|x|=R} = 0$ в данной работе ставится граничное условие в вихревой (роторной) форме.

Ротор двумерных векторных полей является скалярной функцией, даваемой формулой

$$w = rot\,\vec{v} = \partial_{x_1} v_2 - \partial_{x_2} v_1 .$$

Двумерная система уравнений Навье-Стокса с функцией давления $p(t, x)$ для векторного поля $\vec{v} = (v_1, v_2)$ имеет вид:

$$\partial_t \vec{v} - \Delta\vec{v} + (\vec{v}, \nabla)\vec{v} - \nabla p = 0$$

$$div\,\vec{v} = 0$$

Её линеаризация в окрестности v_∞ в вихревой форме представляется скалярным уравнением Озейна

$$\partial_t w - \Delta w + v_\infty w_x = 0 . \qquad (1)$$

Постановка граничного условия прилипания на цилиндре в роторной форме затруднена, так как данное условие является интегральным, и определяется законом Био-Савара. Некоторым упрощением служит критерий подобия нестационарных колебательных течений жидкостей, частота которых определяется числом Струхаля

$$Sh = \frac{2\mu R}{v_\infty},$$

где μ - характерная частота образования вихрей. При этом число Струхаля является постоянным ($Sh \cong 0.2$) для широкого диапазона чисел Рейнольдса ($200 < \mathrm{Re} < 200000$). Тогда граничное условие при $|x| = R$ представляет

собой попеременно возникающие с частотой μ вихри на «южном» и «северном» полюсе цилиндра. При этом данные вихри имеют противоположные направления вращения.

Обозначим через T_1 множество моментов времени возникновения вихря на «северном» полюсе цилиндра ($x_- = (0,R)$), а через T_2 соответственно на «южном» ($x_+ = (0,-R)$). Тогда граничное условие на цилиндре будет иметь вид:

$$w(t,x)\,|_{|x|=R} = \begin{cases} a\delta(t,x), t \in T_1, x = x_- := (0,R) \\ -a\delta(t,x), t \in T_2, x = x_+ := (0,-R) \\ 0, (t,x) \notin T_1 \times x_- \cup T_2 \times x_+ \end{cases} \quad (2)$$

Здесь a - интенсивность сходящих вихрей, $\delta(t,x)$ - дельта-функции, которые в виде свободных вихрей образуют дорожку Кармана.

Начальным условием для уравнения (1) возьмем нулевое распределение вихрей:

$$w\big|_{t=0} = 0. \quad (3)$$

При $|x| \to \infty$ наше течение является плоскопараллельным, что в вихревой форме записывается как

$$w\big|_{|x|=\infty} = 0. \quad (4)$$

В итоге, интегрированию подлежит внешняя начально-краевая задача (1)-(4). Данную систему будем решать методом функции Грина.

3. Численное моделирование

Используя быстрое преобразование Фурье по t:

$$\vec{\omega}(x) = \{\omega^l(x)\}_{l=0}^{L} = FFT(w(t,x)),$$

эллиптическое уравнение (1) сводится к уравнению с параметром l:

$$\Delta\vec{\omega} - l\vec{\omega} = v_\infty \vec{\omega}_x. \quad (5)$$

Численное решение этого уравнения ищется методом Фурье в виде конечного ряда в полярных координатах r, φ. Тогда имеем

$$\vec{\omega}(r,\varphi) = \sum_{k=-N}^{N} e^{ik\varphi}\vec{\omega}_k(r),$$

$$\vec{\omega}_k(r) = \{\omega_k^l(r)\}, k = -N...N, l = 0...L.$$

Обозначим через $\vec{F}_k$ k-й компонент разложения выражения $v_\infty \vec{\omega}_x$:

$$\vec{F}_k(r,\varphi) = \frac{v_\infty}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} \vec{\omega}_x e^{-ik\varphi} d\varphi.$$

Тогда искомое решение во внешности круга определяется интегральным уравнением с функциями Грина $\overrightarrow{G_k}(r,s), \overrightarrow{H_k}(r)$:

$$\vec{\omega}_k(r) = \int_R^\infty \overrightarrow{G_k}(r,s)\cdot\vec{F}_k(s)ds - \vec{\omega}_k(R)\cdot\overrightarrow{H_k}(r) \quad (6)$$

Для переменной r нами используется неравномерная сетка

$$\vec{\Re} = [R, R+\delta_1, R+\delta_2, .., \infty], \delta_1 < \delta_2 < ... < \infty$$

из nR элементов, сгущающаяся при $r \to R$.

Для каждого $l = 0...L$ на сетке $\vec{\Re}$ строится вектор размерности $(2N+1)*nR$:

$$\overrightarrow{W_l} = [\omega_{-N}^l(\vec{\Re}), \omega_{-N+1}^l(\vec{\Re}), ...\omega_0^l(\vec{\Re}), ..., \omega_{N-1}^l(\vec{\Re}), \omega_N^l(\vec{\Re})]$$

Уравнение (6) на пространственной сетке записывается в матричной форме в виде L+1 *систем линейных уравнений* (СЛУ):

$$A_l\overrightarrow{W_l} = \vec{b}_l, \quad l = 0...L. \quad (7)$$

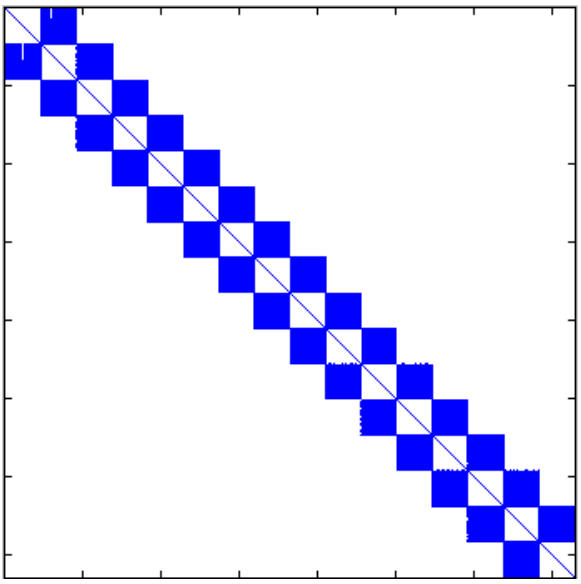


Рис. 2. Разреженность матриц A_l

Матрицы $\{A_l\}_{l=0}^{L}$ являются разреженными (см. Рис. 2), что облегчает процесс решения СЛУ (7) для больших N, nR. При этом

данный алгоритм допускает применение параллельных вычислений, т.к. СЛУ (7) при различных $l = 0...L$ решаются независимо друг от друга.

Решение $w(t,x)$ задачи (1)-(4) находится с помощью обратного преобразования Фурье. Результат моделирования представлен на рисунке 3:

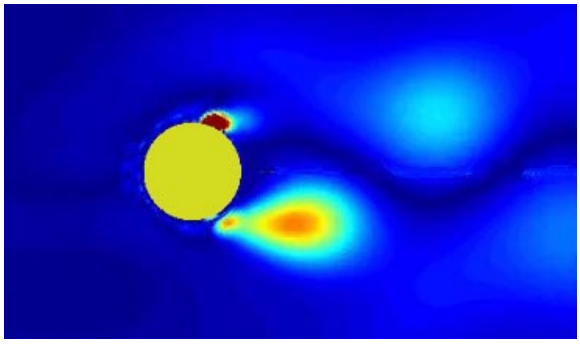


Рис. 3. Численное моделирование отрывного течения

Погрешность решения, представляемая в виде остатка ряда Фурье

$$w^{err}(t,r,\varphi) = \sum_{|k|>N} e^{ik\varphi}\vec{\omega}_k(r),$$

обладает устойчивой оценкой $\int_{|x|>R} |w^{err}(t,x)|^2\, dx \le \frac{C_N}{t^N}$ с константой C_N, зависящей от N.

4. Заключение

В заключении выделим важные особенности предложенного в данной статье метода.

1. *(Замыкание системы на бесконечности).* Вместо всеобъемлющей конечной области, на которой ставится граничное условие, в предложенном подходе граничное условие ставится при $|x| \to \infty$ и решается внешняя задача Дирихле.
2. Граничное условие на цилиндре ставится в вихревой форме.
3. Использование физических законов отрывного течения (критерий подобия колебательных течений) позволяет решать линеаризованную задачу.
4. Использование разреженных матриц и параллельных вычислений позволяет эффективно строить решение на больших отрезках ряда Фурье и мелкой сетке. При этом получаются эффективные оценки ошибки для остатка ряда.
5. *(Линеаризация в окрестности ламинарного течения).* Вместо линеаризации в окрестности плоскопараллельного течения предложенный алгоритм с минимальными изменениями допускает построение возмущенного решения в окрестности любого потенциального течения, выраженного в виде тригонометрического многочлена.

Numerical solution of Oseen equation modeling the flow around cylinder

A.V.Gorshkov, S.B.Rodin

Abstract. In current paper numerical simulation of the flow around cylinder is presented. There is given numerical solution of exterior Dirichlet problem for Oseen equation in curl notation.

Keywords: Oseen equation, computational fluid dynamics, von Karman vortex street, flow around cylinder, direct numerical simulation, implicit difference scheme.

Литература

1. С.М.Белоцерковский, В.Н. Котовский, М.И.Ништ, Р.М.Федоров «Математическое моделирование нестационарного обтекания кругового цилиндра». Изв. АН СССР, МЖГ, 1983, № 4. с. 138-147.
2. Г.Шлихтинг «Теория пограничного слоя». М.: Наука, 1974.
3. Н.А.Слёзкин «Динамика вязкой несжимаемой жидкости». М.: Гостехиздат, 1985.
4. М.А.Кравцова, А.И Рубан «О нестационарном пограничном слое на поперечно обтекаемом цилиндре, совершающем вращательные колебания». Ученые записки ЦАГИ, 1985, т. XVI, № 6, с. 99-102.

К истории вычислительной математики и программирования: Николай Сергеевич Бахвалов

В.М.Тихомиров[1], В.Б.Демидович[2]

1 –*доктор физико-математических наук, профессор*, 2 – *кандидат физико-математических наук*

Аннотация: Статья посвящена творчеству замечательного учёного, специалиста в области фундаментальной и прикладной математики, академика РАН, Николая Сергеевича Бахвалова (29.05.1934-29.08.2005).

Наши личные воспоминания о выдающемся математике, академике Российской академии наук, профессоре Московского Государственного университета, заведующем кафедрой «Вычислительная математика» Мехмата МГУ (1981-2005), Николае Сергеевиче Бахвалове мы решили разбить на две части: в части **I** изложить воспоминания «его ровесника» - *первого* автора, а в части **II** – представить воспоминания *второго* автора из поколения «его учеников».

Сокращённый вариант нижеследующего текста запланирован к публикации (на английском языке) в Международном математическом журнале «Journal of Complexity» по приглашению редколлегии этого журнала.

I. *(В.М.Тихомиров)* Николай Сергеевич Бахвалов родился в Москве, 29 мая 1934 года. Его отец - Сергей Владимирович Бахвалов (1898-1963) - являлся известным геометром, профессором

Московского Государственного университета. Он был участником Первой мировой и Гражданской войн, занимался прикладными проблемами номографии, участвовал в разработке ПУАЗО - прибора управления артиллерийским зенитным огнём, который сын потом изучал на военной кафедре МГУ. Сергей Владимирович оказал большое влияние на своего сына.

Одарённость Коли Бахвалова начала проявляться очень рано. Мальчик сразу пошёл в третий класс, и потому он окончил школу, когда ему только-только исполнилось 16 лет. Перед ним открылась естественная дорога пойти по стопам отца. Он принимал участие в Московских математических олимпиадах и весной 1950 года стал одним из победителей XV школьной математической олимпиады. Летом того же года Н.С.Бахвалов поступил на механико-математический факультет МГУ.

На Мехмате МГУ Н.С.Бахвалов сразу становится одним из руководителей математического кружка для школьников, существовавшего на факультете, и, конечно же, начинает активно заниматься наукой. Курсовую работу на втором курсе он выполнил под руководством Сергея Константиновича Годунова (р. 1929), впоследствии выдающегося математика в области вычислительной математики. На третьем курсе Николай Сергеевич писал курсовую работу уже у Андрея Николаевича Колмогорова (1903-1987).

Начало пятидесятых годов было очень счастливым периодом для Андрея Николаевича Колмогорова. Он имел тогда самые разнообразные замыслы и в математике, и в естествознании, и в педагогике. В частности, Колмогоров поставил на Мехмате МГУ замечательный математический практикум.

Задачи, которые Андрей Николаевич ставил на практикуме, имели, как правило, отдалённые цели. Одной из таких целей была попытка осмыслить численные методы решения дифференциальных уравнений с каких-то общих позиций, другая была связана с теориями дифференциальных уравнений и динамических систем. Владимир Михайлович (тогда просто *Володя*) Алексеев (1932-1980) и Коля Бахвалов, сразу проявившие себя, как способные студенты, были приняты в круг учеников Андрея Николаевича. Володя получил тему по теории особенностей обыкновенных дифференциальных уравнений, Коля - по численным методам. Оба прекрасно справились с поставленными перед ними задачами.

Но именно тогда, летом 1953 года, вскоре после того, как юноши защитили свои курсовые работы, на Колмогорова нахлынула целая лавина новых идей, связанных с динамическими системами, классической механикой, теорией информации, «эпсилон-энтропией» и ещё многим другим. И в его планах на ближайшее будущее у него не осталось места теории численных методов. Алексееву была дана задача по небесной механике о возможности захвата и обмена в задаче трёх тел, которая конечно, не могла не интересовать всех, кто занимался классической механикой - и Ньютона, и Лапласа, и Пуанкаре, но именно в тот момент оказавшаяся на самом острие науки, ибо на идее захвата строилась теория Отто Юльевича Шмидта (1891-1956) о происхождении Солнечной системы. А Бахвалову, почувствовав его интерес к численным методам, но не имея возможности содержательно руководить темой, которая ушла из его первоочередных интересов, Колмогоров предложил сменить научного руководителя. В качестве возможного руководителя по темам, связанным с численными методами, ему был указан Сергей Львович Соболев (1908-1989). Тогда ещё не было общеизвестно, что Сергей Львович сыграл выдающуюся роль в математическом обеспечении атомного проекта.

Сергей Львович взял научное руководство над Н.С.Бахваловым. Он был руководителем его дипломной работы, а затем и кандидатской диссертации. В диссертации произошло соединение многих идей, которые впоследствии определили творческий путь Николая Сергеевича. С одной стороны, в те годы начали внедряться электронно-вычислительные машины, которые радикально начали менять сами подходы к численным методам (и в том, что в работе Бахвалова отражена эта тематика, можно увидеть влияние С.Л.Соболева), с другой стороны, диссертант находился под влиянием упомянутых мною выше идей А.Н.Колмогорова. В своей работе Бахвалов вычисляет асимптотику числа арифметических действий, необходимых при решении задачи Дирихле для оператора Лапласа.

Мы познакомились в середине пятидесятых годов. Так вышло, что Коля имел особую привязанность к моему курсу, где большинство моих сокурсников были его ровесниками. На колином курсе многие, особенно в самые первые годы, относились к Бахвалову, как к младшему (дистанция между шестнадцатью мальчишечьими и восемнадцатью девичьими годами очень значительна), а на нашем курсе Коля был даже больше чем ровесником - он был старшим, уже известным как талантливый математик. Он помогал отстающим, его приглашали на различные посиделки, у него сложились со многими моими сокурсниками дружеские связи на всю жизнь.

У нас с Колей на протяжении большого периода были и общие научные интересы. Как уже было сказано, в первом цикле работ Н.С.Бахвалова чувствуется большое влияние новых идей А. Н. Колмогорова. А я стал учеником Колмогорова. И мы много беседовали о математике на общие для нас обоих темы.

Н.С.Бахвалов активно воспринял колмогоровский «классовый» подход к проблемам оптимизации. Для корректной постановки задачи оптимизации некоторого метода приближения или восстановления, естественно ограничиться какой-то совокупностью функций, на которой производятся

испытания различными методами вычислений. Для получения оценок снизу (чтобы иметь возможность убедиться в том, что лучших оценок получить нельзя) Колмогоров предложил использовать «эпсилон-энтропию». Эту идеологию Бахвалов активно проводил в шестидесятые годы, во многом базируясь на статье в «Успехах математических наук», написанной Колмогоровым совместно со мной.

Николай Сергеевич начал печататься ещё в студенческие годы. К началу шестидесятых годов, за пятилетие своей творческой жизни, он вошёл в очень широкий круг математических проблем. В 1963 году он завершает одну из своих итоговых работ: «Об оптимальных оценках сходимости квадратурных процессов и методах интегрирования типа Монте-Карло на классах функций».

Для характеристики широты творческих интересов Бахвалова, сформировавшихся к тому моменту, приведу список некоторых авторов, цитируемых в этой работе. Это – Сергей Михайлович Никольский (1905-2012), который в своей книге, посвящённой квадратурным формулам, формулирует идею Колмогорова об оценках погрешности, проводимых на классах функций. Это – Израиль Моисеевич Гельфанд (1913-2009), который в ту пору пропагандировал метод Монте-Карло и проводил вычисления с помощью этого метода. Это - Андрей Николаевич Колмогоров с его подсчётами «эпсилон-энтропии» и *n*-поперечников, которые развивались в ту пору Константином Ивановичем Бабенко (1919-1987), Анатолием Георгиевичем Витушкиным (1931-2004), Борисом Самуиловичем Митягиным (р. 1937) и мной. Это – Сергей Львович Соболев с его теорией вложения. Это – Николай Михайлович Коробов (1917-2004), который стал использовать теорию чисел для поиска оптимальных квадратур. Это – Игорь Фёдорович Шарыгин (1937-2004), который под руководством Бахвалова стал применять методы Коробова в теории восстановления интегралов. Это – и (ученик Лазаря Ароновича Люстерника (1899-1981)) Сергей Абрамович Смоляк (р. 1936), который в те же годы начал разрабатывать общую идею восстановления линейных функционалов. Вообще, в указанной работе Бахвалова заложено очень много содержательных идей и результатов, сохранивших своё значение до нашего времени.

Большое влияние на творческую судьбу Бахвалова оказал «семинар трёх К» - трёх Колей - Николая Сергеевича Бахвалова, Николая Михайловича Коробова и Николая Николаевича Ченцова (1930-1992). Первый Коля работал на механико-математическом факультете МГУ, второй – в Математическом институте имени В.А.Стеклова АН СССР (а ныне РАН), третий - в Отделении прикладной математики «стекловского» института (ныне являющимся Институтом прикладной математики имени М.В.Келдыша РАН). И каждый питался своей научной школой – Андрея Николаевича Колмогорова, Ивана Матвеевича Виноградова (1891-1983) и Израиля Моисеевича Гельфанда: первый занимался теоретическими аспектами численных методов, второй - приложениям теории чисел к теории оптимальных квадратур, третий - численным решением конкретных актуальных проблем. В итоге образовалось весьма интересное и плодотворное научное сотрудничество.

Вокруг Н.С.Бахвалова очень рано начала формироваться научная школа. Одним из первых учеников Николая Сергеевича стал, как я уже упомянул об этом, Игорь Фёдорович Шарыгин, учившийся на курсе Владимира Игоревича Арнольда (1937-2010), на два курса моложе, чем мой курс. Мои первые контакты с Игорем Шарыгиным начались по поводу задач, поставленных ему Бахваловым. Второй мой друг, научные контакты с которым происходили в связи с творчеством Бахвалова - Сергей Абрамович Смоляк. Николай Сергеевич сделал очень много для того, чтобы имя Сергея Абрамовича стало широко известным. Он опубликовал научный результат Смоляка о том, что, при некоторых условиях выпуклости, среди оптимальных методов восстановления присутствует линейный метод. Этот результат, содержавшийся лишь в кандидатской диссертации Смоляка, защищённой в 1965 году (по которой Бахвалов был оппонентом), так и остался бы незамеченным, если бы не был бы опубликован Николаем Сергеевичем в его статье «Об оптимальных линейных методах приближения операторов на выпуклых классах функций» (ЖВММФ, т. 11, вып. 4, 1971) под названием ***леммы Смоляка.***

Николай Сергеевич оказал несомненное влияние и на меня. Многие его замечания уже исчезли из памяти, о некоторых я вспоминаю и цитирую их.

Об одном вспоминаю с огорчением. Я поставил перед своими учениками проблему подсчёта разного рода поперечников соболевских классов. Для того чтобы охватить всю проблематику в целом, нужно было определить вложения пересечений соболевских и иных подобных классов в пространство *Lp*. Эту задачу решил, и в периодическом и в непериодическом случае, мой ученик Георгий Георгиевич Магарил-Ильяев (р. 1944). Однажды Николай Сергеевич присутствовал на докладе Магарил-Ильяева, после чего подошёл ко мне и посоветовал прочитать его работу «Теория вложения для классов функций с несколькими ограниченными производными» (Вестник МГУ, сер. мат., мех., вып. 3, 1963), в которой, как ему кажется, он получил что-то подобное. Когда я посмотрел работу Бахвалова, то обнаружил, что задолго до моей постановки задачи вопрос о вложении пересечения соболевских классов в *Lp* для периодического случая был полностью исследован Бахваловым.

Один из учеников Николая Сергеевича Бахвалова - Константин Юрьевич Осипенко (р. 1950) - на протяжении уже более тридцати лет является участником моего семинара по теории экстремальных

задач и теории приближений. Николай Сергеевич, поставив перед Осипенко проблему восстановления аналитических функций, направил его ко мне. Эту задачу К.Ю.Осипенко, Г.Г.Магарил-Ильяев и я стали исследовать на моём семинаре наряду с другими проблемами восстановления.

Дружба Николая Сергеевича с моим курсом имела интересное развитие: он женился на моей сокурснице из группы астрономов Ольге Александровне Козиной **(**р. 1934**).** В 1976 году у них родился сын Саша, который пошёл по стопам своего отца и деда: Саша поступил на механико-математический факультет Московского Государственного университета, закончил его, стал уже доктором физико-математических наук и одним из основных лекторов Мехмата МГУ.

Начиная с середины шестидесятых годов наши научные пути разошлись. И только уже после того, как Николай Сергеевич ушёл от нас, я осознал как много он сделал в нашей науке. Я понял, что он разрабатывал необычайно широкую программу приложений вычислительной математики и новейшей компьютерной техники к естествознанию.

Переход от абстрактной математики к приложениям математики в естествознании было веянием времени. По этой дороге пошли самые выдающиеся представители поколения, к которому принадлежал Николай Сергеевич Бахвалов: Владимир Михайлович Алексеев, Владимир Игоревич Арнольд, Дмитрий Викторович Аносов (р. 1936), Феликс Александрович Березин (1931-1980), Роланд Львович Добрушин (1929-1995), Юрий Иванович Манин (р. 1937), Сергей Петрович Новиков (р. 1938), Яков Григорьевич Синай (р. 1935) и другие. Но, в отличие от всех перечисленных мною учёных, Николай Сергеевич «поверял гармонию законов природы алгеброй компьютерных вычислений».

Деятельность Николая Сергеевича была необычайно многогранна. Он серьёзно вошёл в тематику Рема Викторовича Хохлова (1926-1977) по вопросам генерации и распространения звуковых пучков (и на основе этих исследований он написал работы со своими учениками Григорием Петровичем Панасенко (р. 1954), Яковым Михайловичем Жилейкиным (р. 1937), а также с ученицей Р.В.Хохлова Евгенией Андреевной Заболотской (р. 1935)). Он сотрудничал с лауреатом Нобелевской премии Александром Михайловичем Прохоровым (1916-2002) по решению ряда существенных вопросов распространения мощных волновых потоков в нелинейных средах, связанных с проблемами термоядерного синтеза. Он решал с сотрудниками Объединённого института ядерных исследований задачи по распространению солитонов, проводил исследования движения плотного сгустка электронов, возглавлял научные коллективы из Вычислительного центра МГУ, Сибирского отделения АН СССР, Физфака МГУ, привлекал отдельных учёных из разных вузов для решения актуальных прикладных задач. Добавим, что Николай Сергеевич Бахвалов активно сотрудничал с коллегами по факультету ВМиК МГУ, в частности, с Николаем Петровичем Жидковым (1918-1993).

Вот один из примеров творческого взаимодействия Николая Сергеевича с представителями теоретического естествознания. На протяжении тридцати пяти лет, начиная с 1970 года (последняя работа вышла после смерти Н.С.Бахвалова), он имел плодотворные научные контакты с Маргаритой Эрнестовной Эглит (р. 1935), тоже моей сокурсницей, ныне профессором Мехмата МГУ.

Всё началось с задачи, которая М.Э.Эглит восприняла от своих знакомых географов - о создании математической модели снежных лавин. С этой задачей Маргарита Эрнестовна познакомила Николая Сергеевича. В итоге их сотрудничества появился ряд работ на эту тему, в частности первые в мире программы численного расчёта динамических параметров лавин для ЭВМ.

Но происходило и «обратное движение», когда Николай Сергеевич, создав математическую теорию, искал её приложение в естествознании. Во многих случаях он находил приложение своей теории, также, в сотрудничестве с М.Э.Эглит.

Например, в 1974 году появилась работа Н.С.Бахвалова «Осреднённые характеристики тел с периодической структурой» (ДАН СССР, т. 218, № 5, 1974). Эта работа послужила одним из источников нового направления исследований – математической теории осреднения для задач механики и физики неоднородных сред, таких, как композиты, смеси, пористые среды. В сотрудничестве с М.Э.Эглит Николаем Сергеевичем было опубликовано около тридцати работ, в которых математическая теория осреднения была применена к выводу и обоснованию осреднённых уравнений для различных сред и структур, а также к объяснению и исследованию разных эффектов в неоднородных средах, таких, как аномальное падение скорости звука в смесях (для чего пришлось учитывать малую вязкость и малую сдвиговую упругость, то есть развить теорию осреднения для задач, математическое описание которых содержит сингулярную зависимость от дополнительных малых параметров), или же как дисперсия волн в композитах.

Просматривая творческий путь Николая Сергеевича Бахвалова, невольно испытываешь восхищение его преданности науке. Очень многим обязан Николаю Сергеевичу его родной факультет – Мехмат МГУ, где была воссоздана кафедра вычислительной математики, заведование которой было поручено Н.С.Бахвалову. Под его руководством около пятидесяти аспирантов защитили кандидатские диссертации и свыше десяти из них стали докторами физико-математических наук. Среди последних упомянем, например, нынешнего заведующего кафедрой «Вычислительная математика» Мехмата

МГУ Георгия Михайловича Кобелькова (р. 1947), сотрудников этой кафедры Владимира Васильевича Поспелова (1948-1997), Евгения Владимировича Чижонкова (р. 1959), Андрея Алексеевича Корнева (р. 1969).

Огромное влияние творчество Николая Сергеевича оказало на деятельность специалистов в области вычислительной математики по всей нашей стране, да и далеко за её пределами. Не имея возможности конкретизировать многочисленными фамилиями это высказывание, ограничимся, по этому поводу, лишь упоминанием друга Николая Сергеевича, одного из лидеров «казанской» школы вычислителей, Александра Васильевича Лапина (р. 1950).

Перу Николая Сергеевича Бахвалова принадлежит несколько замечательных книг, в том числе:

Н.С.Бахвалов «Численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений». Киев, Институт кибернетики, 1970;

Н.С.Бахвалов «Численные методы». М., Наука, 1973, 1975;

Н.С.Бахвалов, Я.М.Жилейкин, Е.А.Заболотская «Нелинейная теория звуковых пучков». М., Наука, 1982;

Н.С.Бахвалов, Г.П.Панасенко «Осреднение процессов в периодических средах. Математические задачи механики композитных материалов». М., Наука, 1984;

Н.С.Бахвалов, Н.П.Жидков, Г.М.Кобельков «Численные методы». М., Наука, 1987, 2000, 2001, 2003, 2004;

Н.С.Бахвалов, Г.М.Кобельков, В.В.Поспелов «Задачи по курсу «Методы вычислений»». М., МГУ, 1989;

Н.С.Бахвалов, А.В.Лапин, Е.В.Чижонков «Численные методы в задачах и упражнениях». М., Высшая школа, 2000;

Н.С.Бахвалов, А.А.Корнев, Е.В.Чижонков «Численные методы. Решения задач и упражнения». М, Дрофа, 2009.

Скончался Николай Сергеевич Бахвалов в Москве, 29 августа 2005 года. Я всегда вспоминаю о нём – своём коллеге и друге - с большим душевным теплом, с восхищением перед его творчеством и глубоким сожалением о том, что жизнь его оборвалась, когда он находился в расцвете своих творческих сил.

II. *(В.Б.Демидович)* Решившись написать свои фрагментарные воспоминания о Николае Сергеевиче Бахвалове, я, сначала, задумался, когда же о нём впервые услышал? И припомнилось мне, что было это ещё в мою далёкую школьную пору, в середине 1950-ых годов.

А произошло это так. Как-то раз, обсуждая с отцом (тогда ещё *доцентом*, а впоследствии *профессором* Мехмата МГУ, Борисом Павловичем Демидовичем (1906-1977)), у домашней доски, мои знания по математике, он остался недовольным «нечёткостью» моих ответов. В назидание, он мне рассказал следующее. «У меня – сказал папа - на днях случилась интересная беседа с одним профессором Мехмата МГУ - Сергеем Владимировичем Бахваловым - о преподавания математики в школах. Так вот, в школе, где учился его сын Коля – теперь уже аспирант Мехмата МГУ - если на уроках математики ученики что-нибудь «недопонимали» у учителя, то они просили: «Пусть лучше Коля Бахвалов нам всё это ещё раз объяснит». Видишь, какой авторитет может приобрести в школе ученик у своих одноклассников, причём не за свои спортивные успехи, а за умение чётко и ясно излагать свои мысли». Так я запомнил и фамилию «Бахвалов», и то, что на Мехмате МГУ есть аспирант «Коля Бахвалов, умеющий всё хорошо объяснять».

Шли годы. В 1960-ом году я поступил на Мехмат МГУ. В конце 2-го курса, при распределении студентов «по специализациям», я выбрал «Вычислительный поток», существовавший (в составе 4-ёх академических групп) в те годы на Мехмате МГУ при кафедре «Вычислительная математика», возглавлявшейся Андреем Николаевичем Тихоновым (1906-1993). И с третьего курса «двухгодичный» курс лекций по вычислительной математике на нашем потоке стал читать Николай Сергеевич Бахвалов. Среди моих сокурсников, слушавших эти лекции, были Алексей Фёдорович Шапкин (1943-2011), Евгений Александрович Лапшин (р. 1941) (оба потом стали непосредственными учениками Николая Сергеевича), а также приехавший из Польши для учёбы на Мехмате МГУ Максимилиан Дрыя (р. 1941) (впоследствии ставший учеником Евгения Георгиевича Дьяконова (1935-2006)).

Читал Николай Сергеевич этот, очень глубокий по содержанию, курс, я бы сказал, «в интеллигентной манере». Отвечая на какой-нибудь «нестандартный вопрос», он, не спеша, говорил: «Я не знаю, но мне кажется …», и далее следовал «мгновенно продуманный» и понятный студентам ответ. А ведь бывали и такие лекторы, которые, как иронично комментировал мой отец, «туманно, применяя какую-нибудь модную терминологию, давали аудитории многословный ответ, не разъяснив при этом ничего конкретного».

Осенний семестр 1963-го года этого двухгодичного курса, связанный с численными методами минимизации функционалов, нам неожиданно стал читать Владимир Георгиевич Карманов (1922-2003). Было всё понятно, но, в основном, запомнилась его «театральная манера» чтения весьма стандартного материала. Впоследствии, на одном «последиссертационном банкете», когда я спросил у Николая Сергеевича, почему он третий семестр своего двухгодичного курса отдал читать Карманову, то услышал в ответ:

«Он сам меня попросил. А мне как раз нужно было время для оформления моей докторской диссертации».

На кафедре вычислительной математики я заинтересовался разностными схемами для численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений, а, через них, и просто разностными уравнениями. Но мой тогдашний научный руководитель, Алексей Денисович Горбунов (1916-1990), сказал: «Сейчас главное научное направление нашей кафедры – разработанный А.Н.Тихоновым *метод регуляризации*. И в дипломе надо отразить эффективность его применения. Займитесь-ка восстановлением производных, по экспериментальной информации о функции, с помощью этого метода». В общем, диплом был написан на указанную тему, где основной мой вклад заключался в том, что, при переходе к интегральным уравнениям, я научился «восстанавливать методом регуляризации» не просто первую и вторую производную (как определил мне Алексей Денисович), но и их «линейные комбинации», то есть, по существу, «линейный дифференциальный оператор 2-го порядка». На защите дипломной работы присутствовал Николай Сергеевич и благосклонно отнёсся к моей «самостоятельности».

Направление исследования по кандидатской диссертации мною определялось, вопреки наставлениям Алексея Денисовича, уже без упоминания «метода регуляризации». В аспирантуре я упорно хотел заниматься «обыкновенными» разностными уравнениями, изучив по ним различные публикации (к счастью, их оказалось, к тому времени, не так уж и много – где-то около двухсот). Виктор Владимирович Немыцкий (1900-1967), а затем и Николай Христович Розов (р. 1938), учтя мой интерес к этой тематике и «приобретенную компетентность» в ней, стали активно использовать меня в качестве референта «Реферативного журнала математики», в котором они последовательно курировали тогда отдел «Обыкновенные дифференциальные уравнения» (под-отделом в нём и была тематика «Разностные уравнения»). По поводу лично своих исследований я советовался, конечно же, с отцом, с Виктором Владимировичем Немыцким и Николаем Христовичем Розовым, а также с Алексеем Фёдоровичем Филипповым (1923-2006), с Владимиром Михайловичем Миллионщиковым (1939-2009), с Владимиром Михайловичем Алексеевысм, с Мордухаем Моисеевичем Вайнбергом (1908-1980), с минским профессором Юлием Станиславовичем Богдановым (1920-1987) и с другими «дифурщиками» - всех и не вспомнить. В результате в 1972-ом году, после завершения своей «освобождённой» комсомольской деятельности (в 1969-1970 годы был 1-ым секретарём Комитета ВЛКСМ Мехмата МГУ), я оформил свою кандидатскую диссертации «Об асимптотическом поведении дискретных разностных уравнений», вскоре защищённую в Институте математики АН БССР, где находилась тогда редакция журнала «Дифференциальные уравнения», опубликовавшего основные мои результаты в этой области. Автореферат своей диссертации я подарил и Николаю Сергеевичу Бахвалову, пролиставшему его с интересом.

Но в 1970-ом году Николай Сергеевич перешёл с механико-математического факультета на (образовавшийся в Московском Государственном университете на базе кафедры «Вычислительная математика» Мехмата МГУ) факультет вычислительной математики и кибернетики (сокращённо, факультет «ВМиК МГУ»). Кафедре *общих проблем управления* (ОПУ), где я только-только начал работать, пришлось самим обеспечивать чтение лекций и проведение семинарских занятий по курсам вычислительного и программистского толка на Мехмате МГУ. В этой связи на нашей кафедре стали преподавать (приглашённые на условиях совместительства) Константин Иванович Бабенко, Олег Вячеславович Локуциевский (1922-1990), Владимир Федотович Дьяченко (р. 1929), Всеволод Серафимович Штаркман (1931-2005), Юрий Матвеевич Баяковский (р. 1937), Юлиан Борисович Радвогин (1934-2003), а также (кратковременно) Михаил Моисеевич Бонгард (1924-1971) и Георгий Максимович Адельсон-Вельский (1922-2014). На их плечи пала обязанность вести педагогическую нагрузку на *дневных факультетских потоках.* Однако на Мехмате МГУ был ещё и *вечерний* инженерный поток. Вот Сергей Васильевич Фомин (1917-1975), осуществлявший в те годы реальное руководство кафедрой ОПУ (при внештатном заведующем кафедрой Вадиме Александровиче Трапезникове (1905-1994)), и поручил мне вести (лекционные и семинарские) занятия по курсу «Методы вычислений» на инженерном потоке.

Свой лекционный курс я постарался сделать «нестандартным», продемонстрировав на нём возможность построения вычислительных методов «на базе чебышёвских систем», как-то всерьёз заинтересовавшись ими. Эту идею поддержал Константин Иванович Бабенко, посоветовав, однако, мне ещё заняться и «компьтерными реализациями» получающихся вычислительных процедур. Компьютерный счёт меня не очень привлекал, так что совет Константина Ивановича «повис в воздухе». В общем, я читал «инженерам» свой курс до 1981 года – года возвращения Николая Сергеевича Бахвалова на Мехмат МГУ в качестве заведующего (возрождённой на факультете) кафедры «Вычислительная математика».

Николай Сергеевич заинтересовался содержанием моего курса. Я выступил у него на семинаре. Он отнёсся к нему «не однозначно»: сказал, что готов поддержать мою обзорную публикацию по рассказанному в «хорошем» журнале (даже спросил: “ «Успехи Матнаук» вас устроят?”), но, в то же время, резюмировал, что я читаю не «Методы вычислений», а «Численный анализ», который инженерам не очень

нужен. Я оказался в растерянности. С одной стороны я понимал, что для публикации в «УМН» моё творчество «не дотягивает», а, с другой стороны, читать свой курс «по иному» мне уже не хотелось. В общем, вскоре я оставил чтение этого курса, и включился в преподавание профилирующей дисциплины кафедры ОПУ, на инженерном потоке называемой «Методы оптимизации и вариационное исчисление». Тогда же я, вскоре, попросился «в участники семинара» Владимира Михайловича Тихомирова, занимавшегося широким спектром исследований, касающихся теории экстремальных задач, аппроксимации, оптимального управления и вопросов восстановления. Владимир Михайлович на мою просьбу о подключении к его семинару мгновенно отреагировал: «Буду рад». И с 1987 года я участвую в работе этого семинара. Вот почему, при составлении схемы свой «математической генеалогии», я указываю Владимира Михайловича Тихомирова в качестве своего одного из своих Учителей. Но отношения с Николаем Сергеевичем у меня, по-прежнему, оставались дружескими.

На Мехмате МГУ в 1980-ые годы весьма плодотворно функционировала, для факультетских сотрудников, система «повышения их квалификации» – так называемый «Факультет повышения квалификации» (ФПК). Это был своего рода «полугодовой творческий отпуск раз в пять лет», освобождавший их от обязательной педагогической нагрузки. Но взамен им надлежало «прослушать» (и «сдать при собеседовании») несколько лекционных курсов (по их выбору) из специально подготовленных на Мехмате МГУ «курсов для ФПК». Когда наступила пора мне самому «отправиться на ФПК», то одним из таких курсов я выбрал курс Николая Сергеевича по методам вычислений. Николай Сергеевич очень приветливо к этому отнёсся, попросил меня «сидеть на первой парте в лекционной аудитории 16-24 в качестве своего рода старосты» и, на переменах, не стесняясь, «обсуждать читаемое». Мне было очень интересно слушать его лекции, с одной стороны, уже понятные «до деталей», с другой стороны «раскрывающие новые горизонты» вычислительной математики.

В 1990-ые года наша страна вступила в эпоху демократических преобразований. Материально стало жить труднее. Но, в то же время, появилась возможность «выезжать на Запад». А я уже приобрёл некоторую репутацию «специалиста по чебышёвским системам» и мне присылали «Уведомления» о различных Международных конференциях. В частности, в 1995-ом году в Германии состоялся «3-rd International Congress on Industrial and Applied Mathematics, Hamburg, Jyly 3-7, 1995» (ICIAM 95), о котором мне также прислали «Уведомление». В ответ я послал в Оргкомитет свои тезисы «On structural error estimates on the classes of functions for interpolation in the Space of Smooth Generalized Tchebycheff Polynomials». Они были приняты. Но, в отношении моего приезда в Гамбург, в присланном «Приглашении» была лишь выражена надежда, что я «изыщу возможность получить спонсорскую поддержку» для осуществления своего участия в Конгрессе. Зарплата моя в те годы, в долларовом пересчёте, составляла сумму примерно в $ 60. «Грантовая система» в России только-только начала развиваться, и у меня гранта тогда не было. В общем, на семейном совете мне было сказано: «Тут мы еле-еле сводим концы с концами, а ты задумал свою поездку в Германию, после которой ещё долгов не оберёшься». И мне пришлось отказаться от поездки. А в сентябре того же года, при встрече на факультете Николая Сергеевича, он укоризненно спросил меня: «Что же вы не приехали в Гамбург? Я поддержал в Оргкомитете приглашение вам». Я смущённо, ответил: «Николай Сергеевич! Но у меня просто не было денег для такой поездки». А он снова: «Ну, до Гамбурга долларов за двести можно было бы приехать и на автобусе. А с поселением Оргкомитет для вас что-нибудь придумал бы». Конечно, поддержка меня Николаем Сергеевичем была мне очень приятна, но оставалось чувство неловкости, что я его как-то «подвёл».

И последний припомнившийся мне эпизод, связанный с Николаем Сергеевичем. Я живу на Ленинском проспекте в доме, где жил и профессор кафедры «Теория вероятностей» Мехмата МГУ Александр Дмитриевич Соловьёв (1927-2001). У меня с ним были самые тёплые, дружеские отношения. В конце 1990-ых годов Александр Дмитриевич стал болеть. Так вот (помнится, это было уже в 2000-ом году), когда Александр Дмитриевич находился на лечении в отделении «Центральной клинической больницы Российской академии наук» (ЦКБ РАН), расположенном в «Ясенево», я решил навестить его. Придя в палату, я, по окончании нашей беседы, услышал от Александра Дмитриевича: «А кроме меня здесь находится на обследовании ещё и Коля Бахвалов. Узнав, что сегодня вы придёте ко мне, он передал через меня вам приглашение навестить и его». Я, конечно же, пошёл в палату к Николаю Сергеевичу.

Николай Сергеевич, действительно, меня ждал. По своей природе он был весьма замкнутым человеком и не любил долгие разговоры. А тут я увидел «преображённого» Николая Сергеевича, который стал рассказывать мне о своей жизни. Рассказал и о том, что его отец – Сергей Владимирович – получив в 1917 году (в 19-летнем возрасте) «воинское звание младшего начальствующего состава» (если мне не изменяет память, звание *подпрапорщика* – видимо, после окончания существовавшей в Царской России «Школы гвардейских подпрапорщиков», считавшейся тогда достаточно привилегированным военным учебным заведением), стал служить в Русской армии (и, как я потом прочёл в Internet'е, служба его проходила на румынском фронте в артиллерийской бригаде). А в 1919 году Сергей Владимирович добровольно пошёл на службу в Красную армию, хотя (с осени 1918 года) учился уже

на физико-математическом факультете Московского университета.

Я, сначала, не понял, почему Николай Сергеевич мне об этом рассказал. Но потом пришёл к выводу, что всё объяснялось пробудившемся у меня тогда интересом «к истории Мехмата МГУ» (он об этом уже знал), и ему захотелось именно мне что-то рассказать о своём отце – многолетнем профессоре нашего факультета. Видимо, и в этом случае, проявилось его доверительное ко мне отношение.

На этом я и закончу «мозаику» своих отрывочных воспоминаний о замечательном учёном и прекрасном человеке Николае Сергеевиче Бахвалове.

On the history of Computational Mathematics and Programming: Nikolai Sergeyevich Bakhvalov

V.M. Tikhomirov, V.B. Demidovich

Abstract: This article is devoted to creativity of a remarkable scientist, specialist in the field of Fundamental and Applied Mathematics, Academician of the Russian Academy of Sciences, Nikolai Sergeyevich Bakhvalov (29.05.1934-29.08.2005).