

Известия высших учебных заведений

ЭЛЕКТРОНИКА 5'2007

Научно-технический журнал

Издается с 1996 г.

Выходит 6 раз в год

СОДЕРЖАНИЕ

Материалы электронной техники

Роцин В.М., Яковлев В.Б., Силибин М.В., Ловягина М.С. Исследование свойств наноразмерных пленок титаната-цирконата свинца..... 3

Чаплыгин А.Н., Спириин Е.А., Сизов А.С. Влияние технологии обработки поверхности многокомпонентных оксидных соединений со структурой силленита на кинетику электронных переходов в приповерхностных областях 8

Поголов А.И., Грушевский А.М., Блинов Г.А., Жуков П.А. Исследование напряженно-деформированного состояния материалов гибких шлейфов 13

Микроэлектронные приборы и системы

Мальшев В.А., Михайлов Н.А. Учет влияния шума спонтанного излучения в модели устойчивости стационарной генерации полупроводниковых инжекционных лазеров 18

Микросистемы

Тимошенко С.П., Бойко А.Н., Симонов Б.М. Методика оценки параметров чувствительных элементов микроакселерометров и микрозеркал 23

Зотов С.А. Анализ влияния анизотропных свойств материала на собственные частоты кольцевых резонаторов микромеханических гироскопов 30



Учредители:

Министерство
образования и науки
Российской Федерации

Московский
государственный институт
электронной техники
(технический университет)

Главный редактор
В.Д.Вернер

Редакционная коллегия:

Бархоткин В.А.
Быков Д.В.
Грибов Б.Г.
Казённов Г.Г.
Коноплёв Б.Г.
Копеев Ю.В.
Коркишко Ю.Н.
Королёв М.А.
Кубарев Ю.В.
Неволин В.К.
Неволин В.Н.
Петросянц К.О.
Руденко А.А.
Таиров Ю.М.
Телец В.А.
Тихонов А.Н.
Усанов Д.А.
Чаплыгин Ю.А. (зам. главного редактора)

Адрес редакции: 124498,
Москва, Зеленоград,
проезд 4806, д. 5, МИЭТ
Тел. (495) 534-6205
Факс (495) 530-5429
E-mail: magazine@rnd.miee.ru
<http://www.miet.ru>

Тотов Е.А. МОП-структуры с аморфным триоксидом вольфрама для емкостных сенсоров влажности..... 36

Микропроцессорная техника

Агафонов Ю.М., Акиншин Н.С., Акиншин Р.Н., Анкудинов К.А., Анкудинов А.И., Казаков К.Ю. Применение микроконтроллеров для синтеза цифровых конечных автоматов 40

Информационные технологии

Лихачев А.С., Лупин С.А. Оценка качества речепреобразования в низкоскоростных вокодерах на этапах проектирования 45

Епишин Ю.В. Алгоритм проверки с помощью графа линейной модели на устойчивость..... 53

Погибельский Д.А., Никитов С.А. Применение генетических алгоритмов для оптимизации структуры метаданных Java-приложения 59

Проблемы высшего образования

Лисов О.И., Гриненко Н.С., Ко Ко Аунг Вариативное управление актуализацией знаний в учебном процессе 65

Чжо Чжо Кхаин Программный комплекс актуализации знаний при изучении методов технической диагностики 74

Краткие сообщения

Пашинкин А.С., Малкова А.С., Михайлова М.С. Теплоемкость твердого теллурида висмута 80

Фархшатов Р.Х. Виртуальная файловая система как метапротокол для организации взаимодействия приложений 82

Громов Д.Г., Жигальский Г.П., Карев А.В., Карев И.А., Чулков И.С. Исследование нелинейности вольт-амперных характеристик тонких пленок меди и никеля импульсным методом 84

Аунг Мьинт Эй, Пронин А.А., Кондратов А.В. Экспериментальное исследование затухания радиоволн внутри помещений на частоте 433 МГц..... 86

Милешко Л.П. Особенности процессов гальваностатического анодирования алюминия, кремния и пленок нитрида кремния..... 88

Дубовой Н.Д., Демкин В.И., Со Лин Аунг Система управления соотношением скоростей двухкоординатного шагового привода 90

Конференции. Выставки

XIII Московская промышленная выставка 93

Contents 94

Abstracts 95

К сведению авторов 99

Заведующая редакцией
С.Г.Зверева

Редактор
А.В.Тихонова

Научный редактор
С.Г.Зверева

Художественный редактор
А.В.Тихонова

Корректор
Л.Ф.Летунова

Технический редактор
Л.Г.Лосякова

Компьютерный дизайн, верстка
Е.А.Каменская
А.А.Григорашвили
С.Ю.Рыжков

Подписано в печать 05.10.07
Формат бумаги 60x84 1/8.
Печать офсетная.
Объем 11,63 усл.печ.л.,
10,9 уч.-изд.л.
Заказ № 105

Отпечатано
в типографии ИПК МИЭТ
124498, Москва, Зеленоград,
проезд 4806, д. 5, МИЭТ

Свидетельство о регистрации
№ 014134
выдано Комитетом РФ по печати
12.10.95.

Включен в Перечень периодических научных изданий, рекомендуемых для публикации научных работ, отражающих основное научное содержание докторских диссертаций:
Бюллетень ВАК Министерства образования РФ, 2002, № 1.

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

УДК 621.315.61

Исследование свойств наноразмерных пленок титаната-цирконата свинца

В.М.Рощин, В.Б.Яковлев, М.В.Силибин, М.С.Ловягина

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Исследованы характеристики пленок твердых растворов титанатов-цирконатов свинца толщиной 50–200 нм, полученных на подложках сапфира и кремния низкотемпературным синтезом из пленок сплава $Ti_{52}Zr_{48}$. Изучены морфология поверхности и состав пленок ЦТС, определены некоторые электрофизические характеристики полученных покрытий. Наличие в пленках пьезоэлектрического эффекта наблюдалось по методу Сойера–Тауэра и по зависимости формы петли гистерезиса от величины и частоты приложенного напряжения.

Переход от микро- к наноразмерам элементов современной электроники требует создания диэлектрических слоев с высоким значением диэлектрической проницаемости. Наряду с традиционными для микроэлектроники материалами изучаются возможности использования оксидов титана, гафния, алюминия, нитридов кремния, титанатов бария, свинца и стронция. Однако решение проблемы создания тонких диэлектриков с высоким значением диэлектрической проницаемости, хорошей адгезией к подложке и с локальной шероховатостью поверхности не более 5 нм далеко от завершения. Одним из перспективных направлений является использование пленок твердых растворов титанатов-цирконатов. В этом случае появляется возможность создания слоев активных материалов, имеющих кроме необходимых диэлектрических еще и пьезо- и пироэлектрические свойства, использование которых позволит формировать интегральные элементы функциональной электроники на одном кристалле.

В настоящее время пленки твердых растворов получают по сложной технологии [1, 2], которая включает предварительный синтез твердых растворов оксидов, нанесение их на подложку и последующую высокотемпературную обработку. Такая технология дает возможность получать пленки толщиной от 0,1 мкм. Для более тонких пленок достижение требуемых механических и электрофизических характеристик, а также их воспроизводимость представляет серьезную научную и практическую проблему [3–5].

Эксперимент. В качестве технологии синтеза твердого раствора титаната-цирконата свинца выбран процесс термического окисления пленки сплава $Ti_{52}Zr_{48}$ на подложках полированного сапфира (10 $\bar{1}2$) и кремния (100) ионно-плазменным методом [6]. Окисление проводилось в кислородосодержащем замкнутом объеме с порошком оксида свинца. В качестве параметров процесса синтеза задавалась температура и время отжига. Толщина исходной пленки сплава $Ti_{52}Zr_{48}$ составляла от 20 до 70 нм. Процесс

термообработки проводился в температурном интервале от 673 до 873 К в течение 1–2 ч. Морфология поверхности пленок исследовалась на сканирующем зондовом микроскопе фирмы «НТ-МДТ» Р47 «Solver». Состав и распределение элементов по толщине покрытия определялся по данным ВИМС и сканирующей оже-спектрии.

Результаты и их обсуждение. Морфология поверхности. Исследована морфология поверхности исходной подложки сапфира, пленки сплава $Ti_{52}Zr_{48}$, а также поверхность синтезированных в процессе термообработки пленок твердого раствора титаната-цирконата свинца. Локальная шероховатость исходной поверхности сапфира составляла около 1 нм (рис.1,а). После осаждения пленки сплава $Ti_{52}Zr_{48}$ шероховатость несколько уменьшилась (рис.1,б), причем она практически не зависела от толщины пленки и составляла около 0,5 нм. Определение локальной шероховатости проводилось на сканах атомно-силовой микроскопии (АСМ), при этом в расчет включалась разность высот максимумов и минимумов рельефа поверхности и исключались морфологические отклонения, связанные с локальным несовершенством исходной подложки и посторонними включениями на ней. Снижение локальной шероховатости поверхности пленки сплава являлось следствием формирования покрытия выбранным методом на неподогреваемых подложках [6].

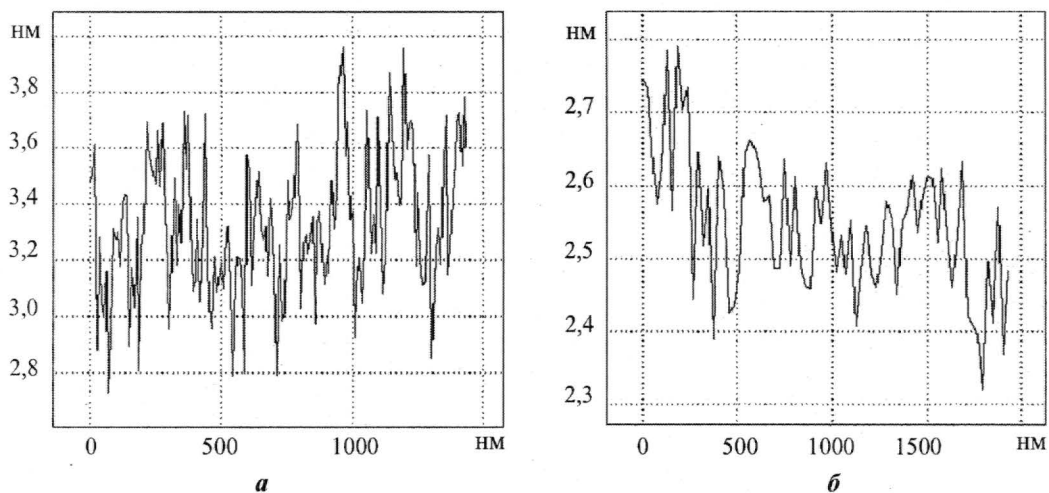


Рис.1. АСМ-профиль поверхности исходного сапфира (а) и поверхности пленки сплава $Ti_{52}Zr_{48}$ толщиной 30 нм (б)

После проведения синтеза морфология поверхности изменялась. Методом АСМ в полуконтактном режиме на поверхности просматривалась характерная блочная структура. Размер кристаллитов пленки слабо зависел от температуры и времени синтеза в указанных диапазонах, что вполне объяснимо малой толщиной пленки и невысокими скоростями нагрева/охлаждения (5 К/мин). В то же время размер и форма кристаллитов зависели от исходной толщины пленки сплава $Ti_{52}Zr_{48}$, что представлено на рис.2 и 3. Для пленок сплава с исходной толщиной 30 нм средний размер зерна, определяемый как расстояние между двумя локальными минимумами, составлял 30–50 нм, в то же время для более толстых исходных пленок сплава (70 нм) кристаллиты имели эллипсоидное сечение с размерами соответственно 40–60 нм и 80–120 нм по взаимно перпендикулярным сечениям (см. рис.3). Анализ рис.2 и 3 показывает, что, по-видимому, кристаллическая структура пленок близка к столбчатой. Кристаллиты, формируясь при окислении пленки сплава и одновременной диффузии в нее свинца, на первом этапе начинают расти во всех направлениях, а затем, испытывая стесненные деформации в плоскости пленки, продолжают рост перпендикулярно поверхности. Отчасти этому процессу способствует и более интенсивный теплоотвод в подложку сапфира.

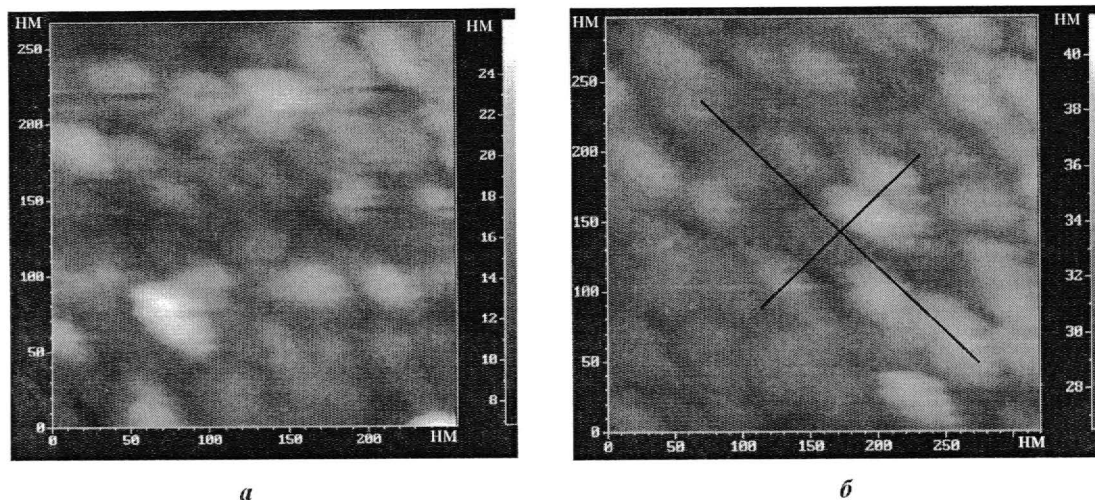


Рис.2. АСМ-изображение поверхности пленки $\text{PbTi}_{0.52}\text{Zr}_{0.48}\text{O}_3$ толщиной 90 нм (а) и 200 нм (б) после синтеза при температуре 723 К

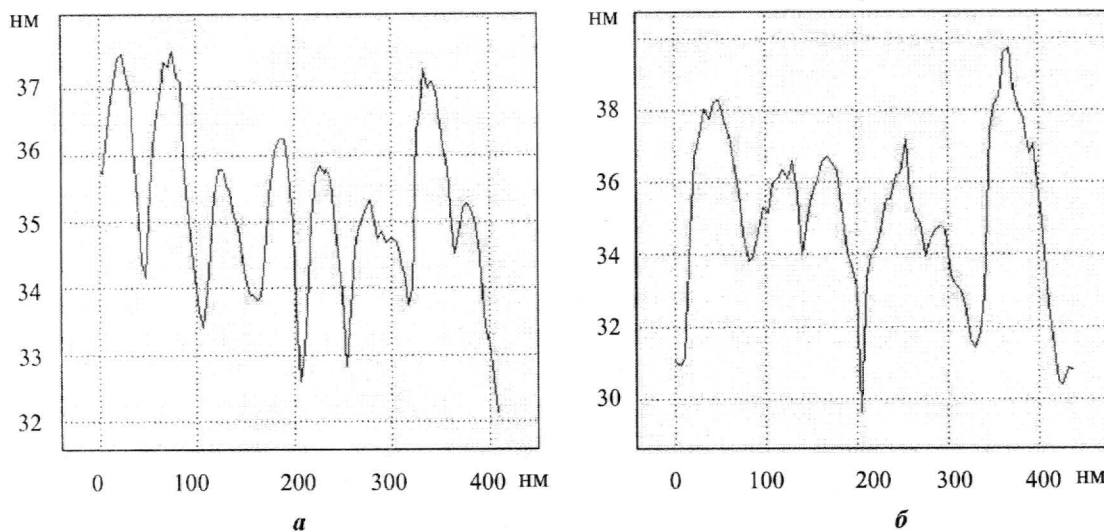


Рис.3. АСМ-профиль поверхности пленки $\text{PbTi}_{0.52}\text{Zr}_{0.48}\text{O}_3$ толщиной 90 нм (а) и толщиной 200 нм после синтеза при температуре 723 К по взаимно перпендикулярным направлениям (см. рис.2,б)

Состав пленок. По данным оже-спектроскопии определено, что с точностью до погрешности метода соотношение титана и циркония в пленке совпадает с аналогичным мольным соотношением компонентов в распыляемой мишени состава $\text{Ti}_{52}\text{Zr}_{48}$. Количество кислорода соответствовало стехиометрическому для оксида состава $\text{Ti}_{0.52}\text{Zr}_{0.48}\text{O}_2$. Измерения проводящих свойств показали диэлектрический характер синтезированного покрытия. Профиль распределения свинца в пленке по данным ВИМС близок к равномерному с небольшим избытком вблизи поверхности, что вполне объяснимо условиями синтеза в присутствии порошкообразного оксида свинца (рис.4.). Анализируя и обобщая полученные результаты можно сделать вывод, что состав пленок близок к составу пленок $\text{PbTi}_{0.52}\text{Zr}_{0.48}\text{O}_3$. Следует отметить, что существенной количественной разницы состава пленок $\text{PbTi}_{0.52}\text{Zr}_{0.48}\text{O}_3$ и распределения элементов в ней по толщине при термообработке в вышеуказанных температурных и временных интервалах выявлено не было.

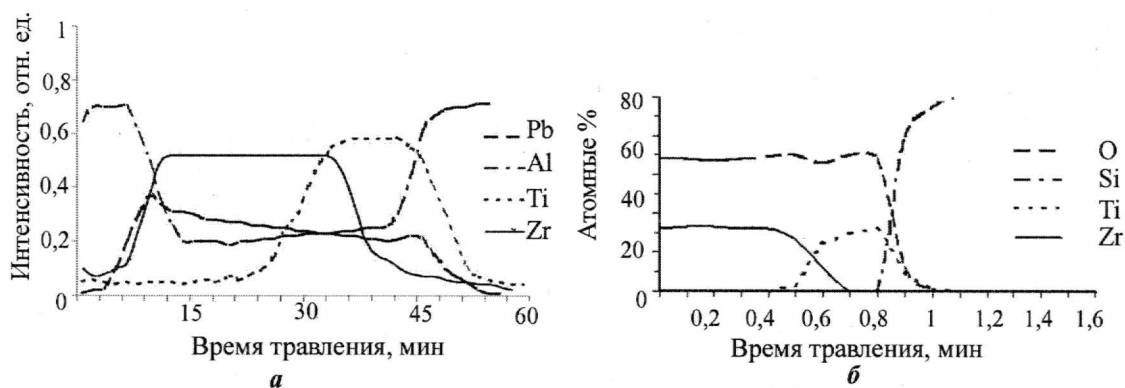


Рис.4. Распределение элементов в пленке $\text{PbTi}_{0,52}\text{Zr}_{0,48}\text{O}_3$ после синтеза при температуре 723 К по данным ВИМС (а) и сканирующей оже-спектроскопии (б)

Пьезоэлектрические свойства. Для изучения пьезоэлектрических свойств синтез пленок твердого раствора титаната-цирконата свинца проводился на подложках кремния и сапфира, на поверхности которых предварительно формировалась многослойная проводящая структура, являвшаяся нижним электродом. В качестве верхнего электрода через маску с отверстиями диаметром 1 мм напылялась пленка серебра.

Измерение пьезоэлектрических свойств проводилось по классической схеме Сойера-Тауэра [7]. Частота синусоидального сигнала изменялась от 0,2 Гц до 1 кГц, а амплитуда напряжения – от 2 до 25 В. Форма петли гистерезиса в зависимости от частоты и амплитуды приложенного синусоидального напряжения представлена на рис.5 и 6. При повышении частоты сигнала форма петли изменяется, наклон приближается к 45°, что характерно для диэлектриков с потерями. При увеличении напряжения более 6 В форма петли также меняется, однако напряжение переполяризации практически остается постоянным. По проведенным оценкам величина коэрцитивного поля для пленок $\text{PbTi}_{0,52}\text{Zr}_{0,48}\text{O}_3$ толщиной 90 нм близка к 6 кВ/см. Существенных различий по свойствам пленок $\text{PbTi}_{0,52}\text{Zr}_{0,48}\text{O}_3$ на подложках сапфира и кремния не выявлено. Аналогичные свойства и формы петель гистерезиса для пленок $\text{PbTi}_{0,52}\text{Zr}_{0,48}\text{O}_3$ были получены и на подложках кремния без нижнего электрода: в качестве последнего использовались проводящие свойства кремниевой пластины КЭФ-4,5 ориентации (100).

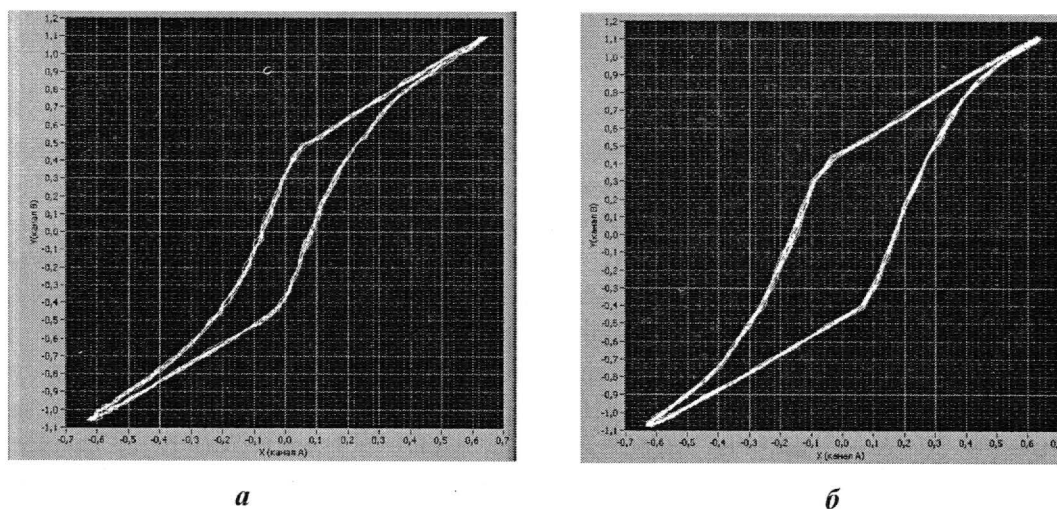


Рис.5. Зависимость формы петли гистерезиса от частоты сигнала для пленки $\text{PbTi}_{0,52}\text{Zr}_{0,48}\text{O}_3$ на подложке сапфира при: а – 50 Гц; б – 100 Гц

Исследованы диффузионные процессы, протекающие при окислении пленок сплава $Ti_{0,52}Zr_{0,48}$ при наличии оксида свинца и показана возможность формирования пьезоэлектрических пленок твердого раствора $PbTi_{0,52}Zr_{0,48}O_3$ в температурном интервале 723–773К с толщиной менее 100 нм на подложках кремния и сапфира. Определена зависимость формы петли диэлектрического гистерезиса от амплитуды и частоты тестового сигнала. Проведена оценка величины коэрцитивного поля для пленок состава $PbTi_{0,52}Zr_{0,48}O_3$ с толщиной менее 100 нм.

Работа выполнена в рамках целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» Минобрнауки (РНП.2.1.2.3890).

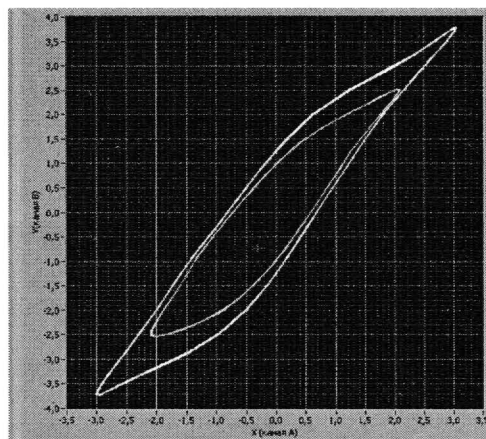


Рис.6. Зависимость формы петли гистерезиса от амплитуды сигнала для пленки $PbTi_{0,52}Zr_{0,48}O_3$ на подложке сапфира

Литература

1. Барфут Дж, Тейлор Дж. Полярные диэлектрики и их применения / Пер. с англ. под ред. Л.А.Шувалова. М.: Мир, 1981. – 736 с.
2. Лайнс М, Гласс А. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы / Пер. с англ. под ред. В.В.Леманова и Г.А.Смоленского. М.: Мир, 1981. – 526 с.
3. Сигов А.С. Сегнетоэлектрические тонкие пленки в микроэлектронике // Сорос. образов. журнал. – 1996. – № 10. – Р. 83–91.
4. Swartz S.L., Wood V.E. Ferroelectric Thin Films // Condensed Matter News. – 1992. – Vol. 1, № 5. – Р. 4–13.
5. Microelectronic Engineering / Eds. P.K. Larsen, G.J.M. Dormans. – 1995. – Vol. 29. – Р. 354.
6. Роцин В.М. Импульсное осаждение дуговой электроэрозионной плазмы в технологии наногетерогенных структур // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2002. – № 3. – С. 10–13.
7. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. – М.: Наука, 1978. – 792 с.

Статья поступила
27 апреля 2007 г.

Роцин Владимир Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры материалов и процессов твердотельной электроники МИЭТ. *Область научных интересов:* физика и технология наногетерогенных систем.

Яковлев Виктор Борисович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры высшей математики № 2 МИЭТ. *Область научных интересов:* физика и механика поликристаллических и композитных сред.

Силибин Максим Викторович – ассистент кафедры высшей математики № 2 МИЭТ. *Область научных интересов:* сверхтонкие пленки, нанокompозиты, наногетерогенные структуры.

Ловягина Мария Сергеевна – аспирант кафедры материалов и процессов твердотельной электроники МИЭТ. *Область научных интересов:* технология диэлектрических пленок.

Влияние технологии обработки поверхности многокомпонентных оксидных соединений со структурой силленита на кинетику электронных переходов в приповерхностных областях

А.Н. Чаплыгин, Е.А. Спирин, А.С. Сизов

Курский государственный технический университет

Выявлены закономерности изменения кинетической кривой фототока в кристаллах силленитов при импульсной фотоактивации в зависимости от технологических особенностей формирования их приповерхностных областей. Дано адекватное экспериментальным данным теоретическое описание электронных переходов на поверхности кристаллов силленитов.

Для создания оптически активных элементов функциональной электроники перспективным направлением является использование многокомпонентных оксидных соединений со структурой силленита ($\text{Bi}_{12}\text{RO}_{20}$, где R – Si, Ge, Ti) [1, 2]. Однако существующие противоречия в толковании приэлектродных явлений в силленитах, особенно в условиях малой информации о поверхности и межфазных реакциях на границах раздела, ограничивают возможности практического использования этих материалов.

Целью работы является оценка влияния технологии обработки поверхности на кинетику электронных переходов в приповерхностных областях многокомпонентных оксидных соединений со структурой силленита для направленного совершенствования параметров оптико-электронных устройств.

Известно, что переходный слой, образуемый на поверхности твердого тела, имеет свойства отличные от объемных [3–5]. При этом на поверхности силленитов в результате механической обработки образуется нарушенный слой (НС), толщина которого в зависимости от режимов обработки достигает 30 мкм [6, 7].

Исследования проводились на разработанной экспериментальной установке для измерения фототока в кристалле силленита при фотоактивации, эквивалентная электрическая схема измерительной цепи которой представлена на рис.1. Для анализа амплитудно-временных зависимостей фототока сигнал с осциллографа через модуль согласования поступал на вход компьютера (на рисунке не показан).

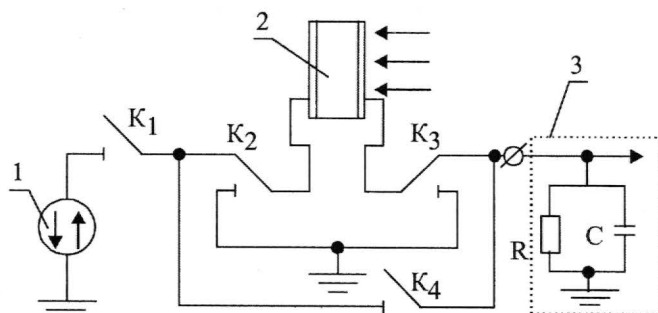


Рис.1. Эквивалентная электрическая схема измерительной цепи экспериментальной установки: 1 – источник напряжения смещения; 2 – кристалл силленита с электродами; 3 – вход измерительного устройства (осциллографа); K_1, K_2, K_3, K_4 – ключи

При проведении исследований использовались четыре группы образцов.

Первая группа – образцы с двухсторонней многостадийной химико-механической полировкой (ХМП); нарушенный слой представлен в виде слабдеформированного подслоя толщиной ≈ 50 нм, электроды прижимные. Вторая – образцы первой группы с НС толщиной до 1 мкм, электроды прижимные. Третья – образцы полированные алмазными порошками по стандартному технологическому маршруту, толщина НС – до 10 мкм, электроды напылены. Четвертая – образцы третьей группы с имплантированной в НС донорной примесью (фосфор), электроды прижимные.

Механическая обработка поверхности кристаллов силиката висмута заключалась в шлифовке и последующей полировке алмазными порошками. На стадии финишной обработки силлениты подвергались ХМП коллоидным кремнеземом, содержащим аморфные частицы SiO_2 размером 50–500 Å, в химически активных средах на основе соляной кислоты и хлорида натрия, содержащих ионы хлора. Качество обработки поверхности контролировалось методами рефлексометрии и обратного резерфордского рассеивания. Фотоактивация образцов кристаллов при фотоэлектрических измерениях проводилась светодиодами, излучающими на длине волны $\lambda = 375$ нм, плотность мощности светового потока E которых составляла 50 мВт/см². Все экспериментальные образцы были изготовлены в виде сэндвич-структур электрод – силленит – электрод (толщина кристалла составляла 850 мкм).

Электрический контакт к кристаллу силленита обеспечивался прозрачными электродами из оксида индия-олова, полученными методом магнетронного распыления в вакууме в атмосфере смеси газов аргона и кислорода, а также прижимными электродами, состоящими из тонкой прозрачной пленки оксида индия, напыленной на кварцевое стекло, пропускающее 97% энергии светового потока в видимом и ультрафиолетовом диапазоне длин волн. В первом случае перед напылением электродов образцы обезжиривались в инертных растворах. Для предотвращения разрушения его приповерхностных областей активация поверхности кристалла в растворах кислот не проводилась [8].

Для улучшения электрического контакта прижимных планарных электродов к противоположным граням кристалла силленита использовался инертный к силленитам электролит (глицерин). В этом случае наблюдались меньшие амплитуды регистрируемого сигнала по сравнению с образцами, на грани которых электроды были напылены. Применение прижимного электрода обусловлено необходимостью исключения диффузионных процессов взаимодействия напыленного электрода с приповерхностной областью кристаллов силленитов, которые влияют на физико-химические свойства границы раздела силленит–электрод.

На рис.2 приведены осциллограммы фотооткликов кристаллов силленитов на импульсное оптическое возбуждение длиной волны 375 нм.

Представленные осциллограммы имеют одинаковый номер импульса, форму которого не искажало влияние переходного процесса, а амплитудно-временной спектр справа и слева от него изменялся монотонно с малыми амплитудами.

На всех полученных кривых в начальный момент времени наблюдается отрицательный фронт нарастания импульса с последующей сменой знака (пик с отрицательным значением амплитуды сигнала), который характеризует процессы инжекции электронов с акцепторных и донорных уровней нарушенного слоя в электрод.

Из рис.2 следует, что при увеличении толщины нарушенного слоя (концентрация акцепторных уровней повышается (см. рис.2,а)) и концентрации его донорных уровней (см. рис.2,б) амплитуда характерного пика возрастает. При этом инжекция электронов из нарушенного слоя в электрод подавляет влияние диффузионно-дрейфовых процессов в толще кристалла силленита, приводящих к поляризации нарушенного слоя, время протекания которых по максимальному значению амплитуды 0,8 нА (см. рис.2,а, кривая 1) составляет 0,8 мс.

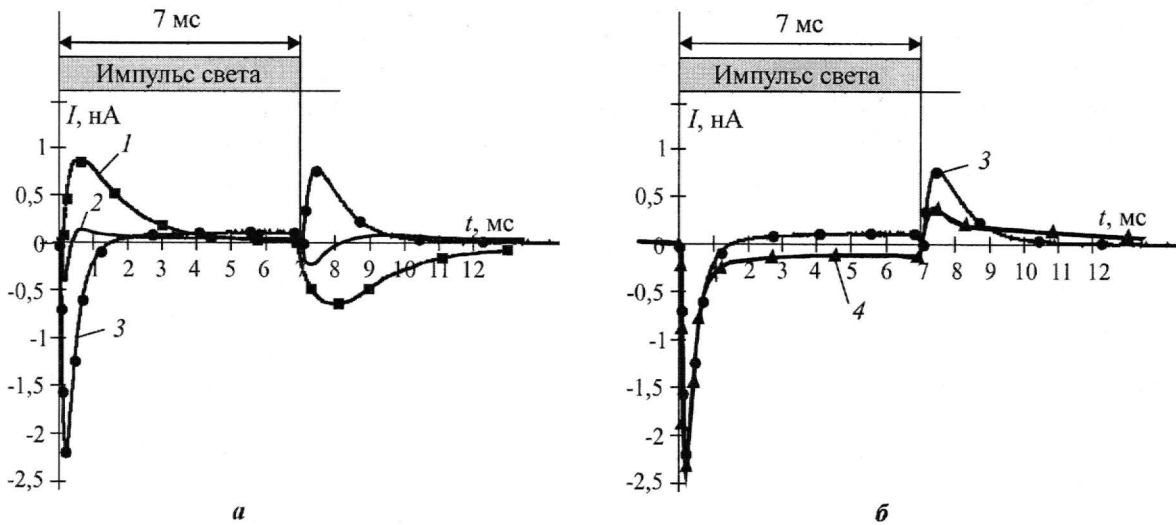


Рис. 2. Осциллограммы фотооткликов кристаллов силленитов на импульсное оптическое возбуждение длиной волны 375 нм для образцов: 1 – первой группы; 2 – второй группы; 3 – третьей группы (а); 4 – четвертой группы (б)

Таким образом, приведенные зависимости подтверждают, что на поверхности кристалла силленита присутствует сильно поглощающий оптическое излучение нарушенный слой, который имеет большое количество дефектов, обусловленных кислородными вакансиями, поэтому в нарушенном слое наиболее вероятно протекание миграционной ионной поляризации.

Процессы электронных переходов на поверхности силленита для кривой 1 (рис.2,а) можно описать балансовым уравнением [9]:

$$\frac{\partial n_S}{\partial t} = k_1 \left(1 - \frac{n_S}{n_{AS}}\right) n_i(0) - k_2 n_S - k_3 n_e n_S, \quad (1)$$

где k_1 – коэффициент захвата (характеризует захват ионов активными поверхностными центрами); $\left(1 - \frac{n_S}{n_{AS}}\right) = f$ – коэффициент занятости реакционных поверхностных центров (n_S – концентрация адсорбированных ионов; n_{AS} – поверхностная плотность реакционных центров); $n_i(0)$ – концентрация свободных ионов в момент времени $t = 0$; k_2 – коэффициент ухода ионов с поверхностных центров; k_3 – константа скорости электронного перехода; n_e – концентрация поверхностных электронов.

Первый член в правой части уравнения (1) описывает ионные переходы из объема на поверхностные центры захвата, второй – обратные переходы с поверхностных центров в объем, третий – процесс нейтрализации адсорбированных ионов поверхностными электронами.

Процессы ионных и электронных переходов происходят достаточно быстро, поэтому решение уравнения (1) необходимо искать на малых промежутках времени с помощью разложения во временные ряды, ограничиваясь линейным приближением:

$$n_i(x, t) = at + o(t^2), \quad (2)$$

где a – величина, пропорциональная плотности мощности экспонирующего излучения; $0(t^2)$ – бесконечно малая величина.

Подставляя (2) в (1), после преобразований получим дифференциальное уравнение для катионов, захваченных поверхностными центрами:

$$\frac{\partial n_S}{\partial t} = k_1 a t - \left[\frac{k_1 a}{n_{AS}} t + (k_2 + k_3 n_e) \right] n_S. \quad (3)$$

Общее решение линейного дифференциального уравнения (3) имеет вид

$$n_S = \left(\int k_1 a t \cdot e^{\left(\frac{k_1 a}{2n_{AS}} t^2 + (k_2 + k_3 n_e) t \right)} dt + C_0 \right) \cdot e^{-\left[\frac{k_1 a}{2n_{AS}} t^2 + (k_2 + k_3 n_e) t \right]}. \quad (4)$$

При подстановке граничных условий в уравнение (4) графическое представление полученных решений на начальных участках временной оси имеет вид кривой 2 на рис.3.

Таким образом, предложенная аналитическая модель адекватна реальным процессам, протекающим в приповерхностной области кристалла силленита. Следует отметить, что экспериментальные результаты, полученные при экспонировании исследуемых кристаллов длинами волн 460 нм и 525 нм, подтверждают правильность предложенной оценки влияния технологии обработки поверхности на кинетику электронных переходов в приповерхностных областях многокомпонентных оксидных соединений со структурой силленита.

В результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований установлено, что отрицательные значения фронта нарастания импульса преимущественно зависят от концентрации в нарушенном слое донорных и акцепторных уровней, которая определяется технологическими особенностями контакта электрод – силленит и технологией модифицирования нарушенного слоя. Получено адекватное экспериментальным данным теоретическое описание электронных переходов на поверхности кристалла силленита при помощи балансового уравнения (1) [9]. Разработаны технологические процессы формирования приповерхностных областей кристаллов силленитов для создания устройств преобразования сигналов.

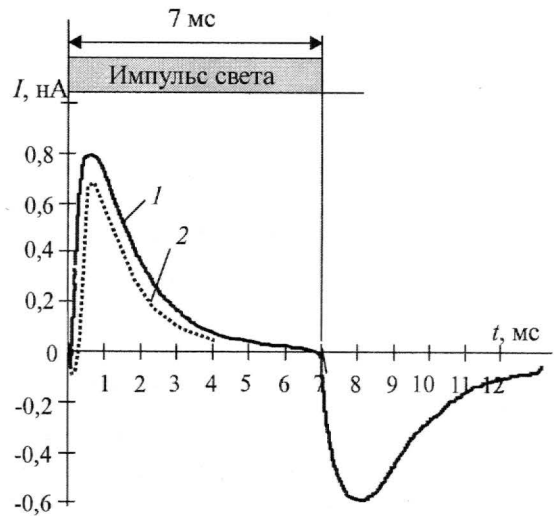


Рис.3. Кинетическая кривая временной зависимости фототока для кристалла силиката висмута, прошедшего многостадийную ХМП при экспонировании длиной волны $\lambda = 375$ нм (кривые: 1 – экспериментальная (соответствует кривой 1 на рис.2,а); 2 – теоретическая)

Литература

1. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. – СПб.: Наука. С.-Петербургское отд., 1992. – 320 с.
2. Каргин Ю.Ф., Бурков В.И., Марьин А.А., Егорышева А.В. Кристаллы $Bi_{12}MxO_{20+8}$ со структурой силленита. Синтез, строение, свойства. – М.: Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова, 2004. – 316 с.

3. *Бехштедт Ф., Эндерлайн Р.* Поверхности и границы раздела полупроводников: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 488 с.
4. *Захаров Н.П., Багдасарян А.В.* Механические явления в интегральных структурах. – М.: Радио и связь, 1992. – 144 с.
5. *Тагиров Р.Б., Зюзин Н.А., Назипов Р.А.* К вопросу о существовании переходного слоя на поверхности твердого тела// Вакуумная техника и технология, 2005. – Т. 15, № 3. – С. 251–256.
6. Получение совершенной поверхности кристаллов типа силленита методом химико-механического полирования (ХМП) / *А.С.Артемов, В.В.Волков, Т.В.Дрягина и др.* // Тез. докл. III Всесоюзной конф. «Актуальные проблемы получения и применения сегнето- и пьезоэлектрических материалов и их роль в ускорении научно-технического прогресса». – М., 1987. – С. 20.
7. Фотоэлектрические и структурные свойства поверхности монокристаллов $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ / *Н.И.Кацавец, Л.Б.Кулева, Е.И.Леонов и др.* // Журнал технической физики. – 1989. – Т. 59, вып. 12. – С. 107–110.
8. *Чаплыгин А.Н., Косолапова О.Н.* Некоторые фотохимические процессы на поверхности кристаллов силленитов при их обработке в химически активных средах // Тез. докл. XII Российской научн.-техн. конф. «Материалы и упрочняющие технологии – 2005». – Курск, 2005. – С. 168–170.
9. *Жакин А.И.* Призлектродные и переходные процессы в жидких диэлектриках// Успехи физических наук. – 2006. – Т. 176, № 3. – С. 289–310.

Статья поступила
6 июня 2007 г.

Чаплыгин Алексей Николаевич – инженер научно-исследовательского сектора КурскГТУ. *Область научных интересов:* технология ГИС СВЧ, фоточувствительных структур; физика и технология тонких пленок.

Спирин Евгений Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры конструирования и технологии электронно-вычислительных средств КурскГТУ. *Область научных интересов:* оптоэлектроника, оптико-электронные системы обработки информации.

Сизов Александр Семенович – доктор технических наук, профессор кафедры информационных систем в экономике КурскГТУ, Заслуженный деятель науки РФ. *Область научных интересов:* проектирование и технология элементов функциональной электроники.

Информация для читателей журнала

«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Вы можете оформить подписку на 2008 г. в редакции с любого номера. Стоимость одного номера – 600 руб. (с учетом всех налогов и почтовых расходов).

Адрес редакции:

124498, Москва, Зеленоград, проезд 4806, д. 5, МИЭТ, комн. 7232

Тел.: (495) 534-62-05. Факс: (495) 530-54-29

E-mail: magazine@rnd.miee.ru

<http://www.miet.ru/static/je/os.html>

Исследование напряженно-деформированного состояния материалов гибких шлейфов

А.И.Погалов, А.М.Грушевский, Г.А.Блинов, П.А.Жуков

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Проведено исследование напряженно-деформированного состояния материалов гибких шлейфов с использованием конечно-элементных моделей. Показано влияние конструктивных и технологических факторов на напряженно-деформированное состояние, установлены наиболее важные факторы прочностной надежности. Даны научно обоснованные рекомендации обеспечения прочности шлейфов.

Гибкие шлейфы применяют при внутриблочном и межблочном монтаже аппаратуры, к которой предъявляют жесткие требования по минимизации массы и габаритов. Материалы шлейфа при многократных перегибах подвержены действию циклических упругопластических деформаций и работают в области малоциклового усталости [1, 2].

Расчетная схема гибкого печатного шлейфа показана на рис.1. Медные проводники (размер поперечного сечения – ширина 80 мкм, высота 12 мкм) расположены с шагом 150 мкм на полиимидном носителе толщиной 40 мкм. Медные проводники облужены припоем олово–висмут, толщина полуды 3 мкм. В месте перегиба для снижения напряжений в меди на проводники наносят защитное покрытие, для которого используют следующие материалы: эпоксидный клей ВК-9, полиуретановый клей УР-600, полиакриловый клей ЭМ и силиконовый клей К-68 (Виксинт).

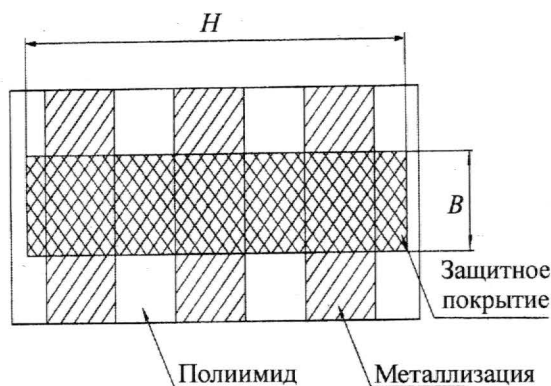


Рис.1. Расчетная схема гибкого печатного шлейфа

Физико-механические свойства материалов представлены в табл.1, где E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона; $[\sigma]$ – допускаемые напряжения [2, 3].

Таблица 1

Физико-механические свойства исследуемых материалов

Материал	E , МПа	μ	$[\sigma]$, МПа
Медь	$7,6 \cdot 10^4$	0,35	100
Полиимид	$2 \cdot 10^3$	0,34	80
Припой	$4,6 \cdot 10^4$	0,36	26
Клей ВК-9	14	0,3	30
Полиуретан УР-600	10	0,35	55
Полиакриловый клей ЭМ	$2,4 \cdot 10^3$	0,35	50
Виксинт К-68	3	0,2	10

Исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) материалов гибких шлейфов проводили с помощью программного комплекса, основанного на методе конечных элементов (МКЭ) [4]. Фундаментальный принцип МКЭ заключается в физическом разбиении изучаемой области тела на элементарные области конечных размеров, которые называют конечными элементами (КЭ). В этом принципиальное отличие МКЭ от остальных численных методов, базирующихся на математической дискретизации уравнений граничных задач.

Погрешности МКЭ обусловлены ошибками:

- дискретизации, являющимися результатом геометрических различий границы рассматриваемого изделия и его модели;
- базисной функции, обусловленными разностью между точным решением и ее представлением в виде комбинации базисных функций данного вида;
- округления, связанными с конечной длиной разрядной сетки компьютера и большим числом операций, выполняемых при решении задачи МКЭ.

С уменьшением размера КЭ уменьшаются только ошибки дискретизации. Для оценки погрешности выполняют несколько расчетов при различных разбиениях области на КЭ. По результатам этих расчетов строится зависимость рассчитанных, например, напряжений или деформаций от размера КЭ, что позволяет выполнить экстраполяцию на случай размера КЭ, стремящегося к нулю.

Заметную роль могут играть ошибки округления. При большом числе элементов решение может расходиться из-за накопившихся ошибок округления. Эти ошибки наиболее существенны, если КЭ сильно вытянуты или имеют углы, близкие к 0 или 180°.

Наилучшими в этом смысле являются КЭ в виде правильных многоугольников (квадрат, куб, правильный тетраэдр). Приемлемыми являются элементы с отношением сторон до 1:4 и углами 30–150°.

При разработке КЭМ гибких шлейфов использовали объемные изопараметрические элементы. Минимальный линейный размер конечного элемента составлял 1 мкм, исследуемые модели содержали до $5 \cdot 10^5$ узлов.

Расчет на прочность при простых видах нагружения основан на сравнении максимального расчетного напряжения с допускаемым предельным напряжением, определяемым экспериментально. Такой подход возможен в том случае, когда напряженное состояние в рассчитываемой детали подобно имеющемуся при экспериментах. Экспериментальные данные о прочности материала в случае сложного нагружения при предельном состоянии, подобном данному, в литературе отсутствуют. Поэтому для установления условий эквивалентности различных напряженных состояний с точки зрения их прочности, а также для расчетов на прочность при сложном напряженном состоянии на основании результатов испытаний, полученных при простейших напряженных состояниях, используют гипотезы прочности. Гипотезы прочности устанавливают условия эквивалентности различных напряженных состояний и служат основой для вывода формул эквивалентного напряжения σ_3 .

При исследовании прочности материалов гибких шлейфов использовали гипотезу энергии изменения формы:

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]},$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения в конечном элементе [5]. Схема нагружения половины модели гибкого шлейфа и распределение эквивалентных напряжений пред-

ставлены на рис.2. Распределение эквивалентных напряжений по толщине шлейфа на фоне КЭМ показано на рис.3. Результаты анализа конечно-элементного расчета представлены в табл.2.

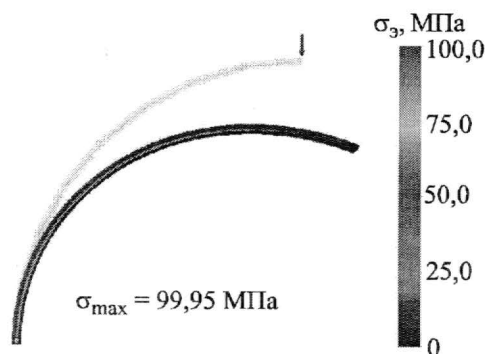


Рис.2. Схема нагружения гибкого печатного шлейфа

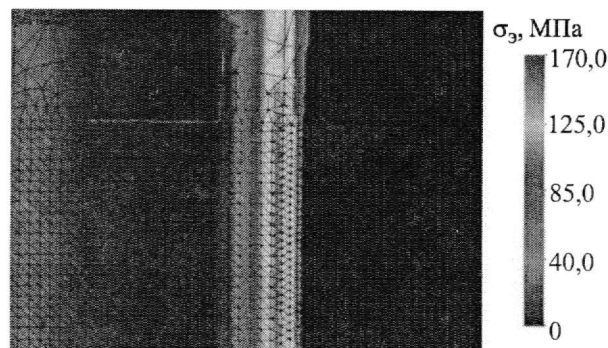


Рис.3. Распределение эквивалентных напряжений по толщине гибкого шлейфа на фоне КЭМ

Таблица 2

Эквивалентные напряжения (в МПа) в материалах сборки

Номер модели	Медь	Припой	Полиимид	Клей
№1 базовая (клей К-68)	100	11,99	16,3	0,02
№2 (клей УР-600)	99,5	12,04	16,26	0,065
№3 (клей ВК-9)	99,3	12,07	16,24	0,09
№4 (клей ЭМ)	32,8	25	9,6	7,81
№5 (клей К-68; $H = 100$ мкм)	99,8	12	16,18	0,04
№6 (клей К-68; $H = 30$ мкм)	101	12	16,34	0,11
№7 (радиус $R = 5$ мм)	33	4,5	5,23	0,007
№8 (радиус $R = 1$ мм)	169	26,4	27,4	0,031
№9 (клей К-68; $B = 0,5$)	101	12,02	16,3	0,019
№10 (клей ЭМ; $B = 0,5$)	67,4	22,3	9,6	7,80

Разработано десять трехмерных моделей. В базовой модели №1 для защиты медных проводников использовали клей К-68. Толщина защитного покрытия составила 50 мкм. Защитное покрытие нанесено на длине, равной величине полуокружности перегиба шлейфа. В моделях №2, №3, №4 в качестве защитного покрытия использовали клей УР-600, ВК-9 и ЭМ соответственно. Модели №5 и №6 отличаются от базовой модели толщиной защитного покрытия, которая составила 100 и 30 мкм соответственно. Модели №7, №8 отличаются от базовой модели радиусом перегиба, который составил 5 и 1 мм соответственно. В модели №9 защитное покрытие (клей К-68) нанесено на половине полуокружности перегиба шлейфа. Относительная длина защитного покрытия (отношение длины покрытия к длине полуокружности перегиба шлейфа) составила $B = 0,5$. Модель №10 отличается от модели №9 материалом защитного покрытия – вместо силиконового клея К-68 использовали полиакриловый клей ЭМ.

Проведенные исследования показали, что наиболее значимыми факторами прочности гибких шлейфов является радиус перегиба и материал защитного покрытия.

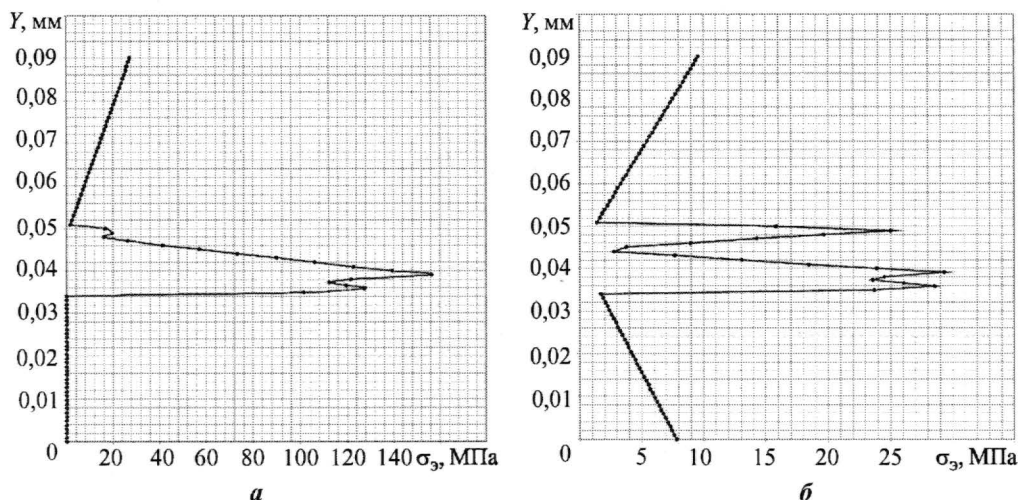


Рис.4. Эпюра распределения эквивалентных напряжений в материалах шлейфа для базовой модели №1 (а) и модели №4 (б)

На рис.4 показана эпюра распределения эквивалентных напряжений в материалах шлейфа для базовой модели №1 (защитное покрытие клей К-68) и модели №4, где в качестве защитного покрытия использовали полиакриловый клей ЭМ. Применение жесткого клея ЭМ, имеющего высокое значение модуля упругости, позволило снизить напряжение в медных проводниках с 100 до 32,8 МПа.

На рис.5,а представлена зависимость максимальных эквивалентных напряжений в медном проводнике от радиуса перегиба шлейфа. Видно, что при радиусе перегиба 3 мм напряжения в меди достигают предела текучести 100 МПа, а при радиусе перегиба 1 мм напряжения близки к пределу прочности меди $\sigma_B = 180$ МПа. Чтобы исключить пластические деформации в меди, радиус перегиба шлейфов не должен превышать 3 мм.

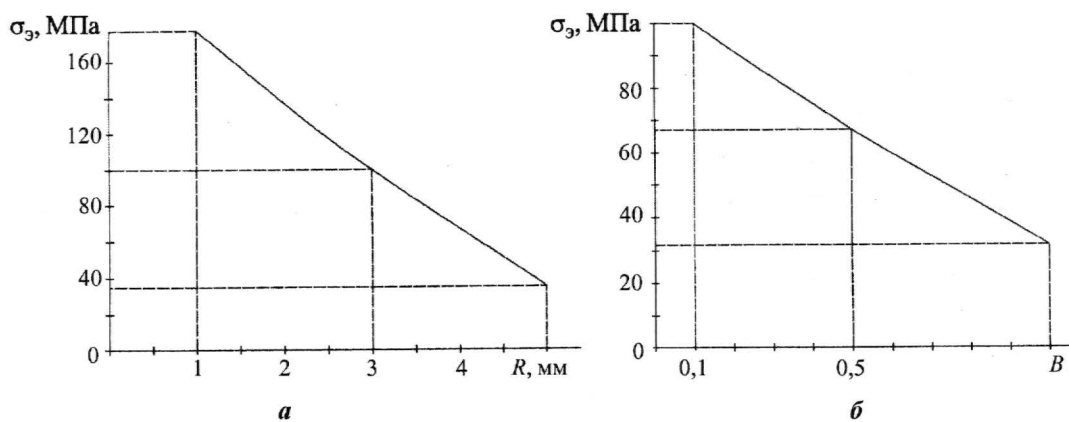


Рис.5. Зависимость максимальных эквивалентных напряжений в медном проводнике от радиуса перегиба шлейфа (а) и относительной длины защитного покрытия (б)

Зависимость максимальных эквивалентных напряжений в медном проводнике от относительной длины защитного покрытия показана на рис.5,б. Нанесение защитного покрытия по всей длине полуокружности перегиба ($B = 1$) позволяет снизить напряжения в меди в 3 раза.

Результаты трехмерного моделирования и инженерный анализ моделей гибких печатных шлейфов при перегибах позволили сформулировать следующие выводы и рекомендации обеспечения прочностной надежности.

Наиболее значимыми факторами прочностной надежности гибких печатных шлейфов являются материал защитного покрытия медных проводников, радиус перегиба шлейфов, длина защитного покрытия.

Для защитного покрытия медных проводников гибких печатных шлейфов необходимо использовать жесткий полиакриловый клей ЭМ ($E = 2400$ МПа), что позволит снизить напряжение в меди в 3 раза. Причем жесткость защитного покрытия и полиимидного носителя на изгиб должны быть равны.

Защитное покрытие из полиакрилового клея ЭМ технологически целесообразно нанести по всей длине полуокружности перегиба шлейфа. Это позволит снизить максимальные напряжения в меди с 100 до 32,8 МПа и обеспечить запас прочности ≥ 3 .

Литература

1. **Поголов А.И., Грушевский А.М., Семенов С.Н., Блинов Г.А.** Моделирование и прочностной анализ гибких шлейфов // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2006. – № 1. – С. 49–54.
2. **Кузнецов О.А., Поголов А.И., Сергеев В.С.** Прочность элементов микроэлектронной аппаратуры. – М.: Радио и связь, 1990. – 144 с.
3. Физические величины: Справочник /Под ред. И.С.Григорьева, Е.З.Мейлахова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
4. **Алямовский А.А.** Solid Works / COSMOS Works. Инженерный анализ методом конечных элементов. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 432 с.
5. **Феодосьев В.И.** Сопротивление материалов: Учеб. для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000. – 592 с.

Статья поступила
27 марта 2007г.

Поголов Анатолий Иванович – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой технической механики МИЭТ. *Область научных интересов:* механика материалов и конструкций микроприборов.

Грушевский Александр Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры микроэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* твердотельная электроника, технология сборки и монтажа микросистем.

Блинов Геннадий Андреевич – доктор технических наук, профессор кафедры микроэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* твердотельная электроника, технология сборки и монтажа микросистем.

Жуков Павел Александрович – аспирант кафедры микроэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* проектирование и технология электронных средств.

МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.373

Учет влияния шума спонтанного излучения в модели устойчивости стационарной генерации полупроводниковых инжекционных лазеров

В.А.Малышев, Н.А.Михайлов

Технологический институт Южного федерального университета в г. Таганроге

Найдены и проанализированы условия реализации устойчивых и неустойчивых режимов стационарной генерации инжекционных полупроводниковых лазеров с учетом влияния спонтанного излучения, попадающего в рабочую моду резонатора и действующего как шумовая компонента.

Динамика излучения полупроводниковых инжекционных лазеров подробно исследована в работах [1–4]. В настоящей работе получена диаграмма устойчивости генерации таких лазеров с учетом следующих факторов. Исследуется влияние на устойчивость стационарной генерации спонтанного излучения, фактически порождающего шумовую компоненту излучения. В скоростных уравнениях учитываются индуцированные переходы на верхние уровни, зависимость вероятности спонтанного излучения от концентрации дырок в валентной зоне (ограниченное спонтанное излучение), вызванные теплом спонтанные переходы электронов в зону проводимости из валентной зоны, также зависящие от концентрации электронов в зоне проводимости. На основе представлений, приведенных в [5, 6], в приближении ограниченных спонтанных переходов получены и исследованы на предмет анализа устойчивости стационарной генерации скоростные уравнения (уравнения Статца де Марса [7, 8]).

Согласно [5, 6] статистические веса и плотность энергетических уровней в валентной зоне и в зоне проводимости узкозонного полупроводника в гетеропереходе или в области p - n -перехода гомолазера одинаковы. В диапазоне энергий $\Delta\varepsilon = h(\Delta\nu)$ будем полагать равновероятным взаимодействие квантов и электронов, причем $\Delta\nu$ – диапазон частот одной рассматриваемой продольной моды резонатора, где считаем равномерно распределены частоты всех рассматриваемых квантов и плотность уровней в единице объема равна n_0 . Рассмотрим две группы уровней.

Первая группа – верхние уровни валентной зоны, концентрация электронов на которых равна n_1 , причем в отсутствие тепла, накачки и сигнала $n_1 = n_0$. Эти уровни являются поставщиками электронов при индуцированном и тепловом спонтанном их возбуждении и приемником электронов при их индуцированной и спонтанной рекомбинации.

Вторая группа – нижние уровни зоны проводимости, концентрация электронов на которых равна n_2 , что и создает инверсную населенность по отношению к электронам n_1 , причем $n_1 + n_2 = n_0$. Тогда уравнение кинетики изменения n_2 будет иметь вид

$$\frac{dn_2}{dt} = D - I_{21}(n_2 - n_1) - p_{21}n_2 + p_{12}n_1, \quad (1)$$

где D – скорость прихода электронов в зону проводимости из цепи питания (скорость накачки) и соответственно скорость их ухода из уровней n_0 валентной зоны в цепь питания (а точнее, скорость перехода дырок из цепи питания). Если плотность тока питания равна j , а протяженность области генерации ℓ , то $D = j/e\ell$, где e – заряд электрона. $I_{21} = V\sigma_{21}J_0$ – вероятность индуцированного перехода у одного электрона из числа n_1 и n_2 в единицу времени, где σ_{21} – поперечное сечение индуцированного взаимодействия одного кванта и электрона; J_0 – объемная концентрация рабочих квантов $h\nu$; V – скорость квантов. Следует отметить, что интенсивность (светимость излучения) частоты ν равна $I = h\nu J_0 V = I_{21}h\nu/\sigma_{21}$. Величины p_{21} и p_{12} – это вероятности в единицу времени спонтанного перехода электронов из числа n_2 на нижние уровни валентной зоны (p_{21}) и соответственного теплового перехода электронов из числа n_1 на верхние уровни (p_{12}).

Аналогичным образом получаем уравнение кинетики изменения концентрации n_1 :

$$\frac{dn_1}{dt} = -D + I_{21}(n_2 - n_1) + p_{21}n_2 - p_{12}n_1. \quad (2)$$

Очевидно, что вероятность p_{21} пропорциональна количеству свободных уровней (дырок) в валентной зоне, так что $p_{21} = \sigma_{p2}V_2(n_0 - n_1)$ и аналогично $p_{12} = \sigma_{p1}V_1(n_0 - n_2)$, где σ_{p2} и σ_{p1} – соответствующие поперечные сечения процессов; V_2 и V_1 – средние относительные скорости дырок и электронов.

С учетом того, что $n_1 + n_2 = n_0$ из (1) и (2) для $\Delta n = n_2 - n_1$, получим

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = 2D - 2I_{21}(\Delta n) - 2\sigma_{p2}V_2n_2^2 + 2\sigma_{p1}V_1n_1^2. \quad (3)$$

В режиме стационарной генерации выполняется равенство

$$n_{20} - n_{10} = \Delta n_0 = \frac{[2\alpha_1 L + \ell n(1/\Gamma_1 \Gamma_2)]}{\sigma_{21} L} = \frac{2\bar{\alpha}_1}{\sigma_{21}}, \quad (4)$$

где α_1 – постоянная затухания амплитуды поля излучения; L – длина резонатора; Γ_1 и Γ_2 – коэффициенты отражения поля от зеркал резонатора; $\bar{\alpha}_1$ – усредненная с учетом прохождения зеркал постоянная затухания поля. Введем обозначения:

$$\begin{aligned} q_{21} &= \sigma_{p2}V_2; \quad q_{12} = \sigma_{p1}V_1; \\ \tau &= n_0 V \sigma_{21} t; \quad \Phi = \frac{2I_{21}}{n_0 V \sigma_{21}}; \quad \theta = \frac{\Delta n}{n_0}; \quad \varkappa = \frac{\Delta n_0}{n_0}; \quad N_0 = \frac{2D}{n_0^2 V \sigma_{21}}; \\ N - N_1 + \left(\frac{\lambda - 1}{2}\right)K; \quad K &= \frac{q_{21}}{V \sigma_{21}}; \quad \lambda = \frac{q_{12}}{q_{21}} \end{aligned} \quad (5)$$

и учтем, что $4n_1^2 = (\Delta n)^2 - 2n_0(\Delta n) + n_0^2$; $4n_2^2 = (\Delta n)^2 + 2n_0(\Delta n) + n_0^2$. Уравнение изменения интенсивности луча в процессе его движения вдоль оси x имеет вид

$$\frac{dI}{dx} = \sigma_{21}(\Delta n)I - 2\bar{\alpha}_1 I + bh\nu q_{21} \left(\frac{\Delta n + n_0}{2} \right)^2, \quad (6)$$

где b – доля спонтанного излучения, попадающая в рабочую моду резонатора. Последний член в (6) получен с учетом того, что из (1) следует выражение

$$dJ_0/dt = p_{21}n_2 = q_{21}n_2^2 = q_{21} \left(\frac{\Delta n + n_0}{2} \right)^2. \quad (7)$$

Учитывая, что $dx = Vdt$, из уравнений (3) и (6) можно получить после деления всех членов (3) на $n_0^2 V\sigma_{21}$ и всех членов (6) на $h\nu V\sigma_{21} n_0^2/2$ модифицированные для данного случая уравнения Статца де Марса:

$$d\theta/d\tau = N - \theta[\Phi + K(1 + \lambda)] - (1 - \lambda)\theta^2 K/2; \quad (8)$$

$$d\Phi/d\tau = (\theta - \alpha)\Phi + \frac{bK}{2}(\theta + 1)^2. \quad (9)$$

В этих уравнениях безразмерные параметры имеют следующий смысл: Φ – параметр интенсивности излучения; N – параметр накачки; α – параметр потерь; θ – степень инверсной населенности лазера; τ – время; K – параметр отношения вероятностей рекомбинации и возбуждения в полупроводниковой структуре; λ – параметр теплового возбуждения электронов.

Так как флуктуационные уравнения рассматриваются в малосигнальном приближении и параметр b обычно не велик, то при получении этих уравнений воспользуемся таким приближением. Рассмотрим режим стационарной генерации, когда $\theta = \theta_0$; $\Phi = \Phi_0$. Полагая в (9) $bK/\Phi \ll 1$, получим

$$(\theta + 1) = \frac{\Phi}{bK} \left[\sqrt{1 + \frac{2(1 + \alpha)bK}{\Phi}} - 1 \right] \approx \frac{\Phi}{bK} (1 + \alpha) \frac{bK}{\Phi} = (1 + \alpha), \quad (10)$$

так что $\theta = \theta_0 = \alpha$ и в этом приближении найдем из (8)

$$\Phi = \Phi_0 = (N/\alpha) - \alpha(1 - \lambda)K/2 - K(1 + \lambda). \quad (11)$$

Полагая, что θ и Φ получили малые приращения θ_1 и Φ_1 :

$$\begin{aligned} \theta &= \alpha + \theta_1; \quad \Phi = \Phi_0 + \Phi_1; \quad \theta_1 \ll \alpha; \quad \Phi_1 \ll \Phi_0; \quad \theta^2 = \alpha^2 + 2\theta_1\alpha; \\ (\theta + 1)^2 &= (\alpha + 1)^2 + 2(\alpha + 1)\theta_1, \end{aligned} \quad (12)$$

посмотрим, как будут вести себя эти приращения в течение времени. Подставив (12) в (8) и (9), получим

$$d\theta_1/d\tau = -\alpha\Phi_1 - M\theta_1; \quad M = \Phi_0 + K(1 + \lambda) + K^2(1 - \lambda)\alpha; \quad (13)$$

$$d\Phi_1/d\tau = [bK(\alpha + 1) + \Phi_0]\theta_1. \quad (14)$$

Дифференцируя уравнение (14) по τ и используя (13), получим

$$d^2\Phi_1/d\tau^2 + Md\Phi_1/d\tau + \alpha B\Phi_1 = 0; \quad B = \Phi_0 + bK(\alpha + 1). \quad (15)$$

Будем искать решение уравнения (15) в виде $\Phi_1 = Ae^{\gamma t}$, подставляя в (15), получим уравнение $\gamma^2 + M\gamma + B\alpha = 0$, имеющее решение

$$\gamma = \frac{M}{2} \left[\sqrt{1 - \frac{4B\alpha}{M^2}} - 1 \right]. \quad (16)$$

Из (16) следует, что при большой накачке, когда выполняются условия

$$B > 0; \quad M^2 > 4\alpha B \quad (17)$$

или иначе

$$N > \alpha K [1 + \lambda - b + \alpha(0,5(1 - \lambda) - b)]; \quad (18)$$

$$N > 2\alpha^2 \left[1 - K(1 - \lambda)/4 \pm \sqrt{1 - K(1 - \lambda) + [bK(\alpha + 1) - K(1 + \lambda)]/\alpha} \right],$$

реализуются стационарные автоколебания, имеющие устойчивость типа устойчивого узла. При меньшей накачке, когда второе условие (17) и (18) не выполняется, имеют место устойчивые фокусы и режим самомодуляции. В случае же совсем малой накачки, когда $B \leq 0$, реализуются неустойчивые автоколебания с устойчивостью типа седла. Подкорненное выражение в (18) положительно при

$$\alpha > \frac{K[(1 + \lambda) - b]}{1 + bK - K(1 - \lambda)} = A,$$

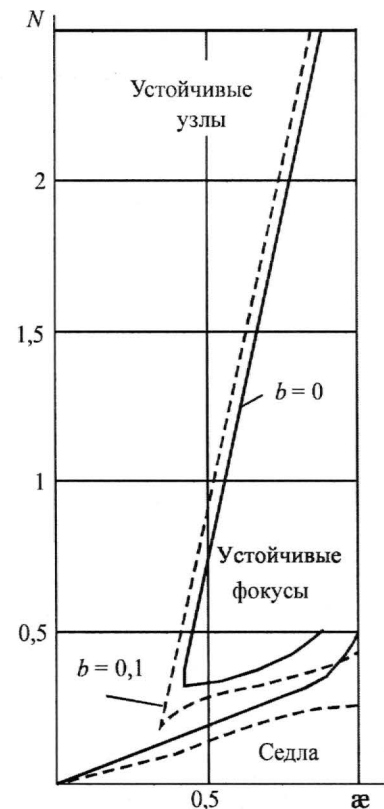
а с учетом значения α в (5) получается, что $1 \geq \alpha \geq A$.

Для случая, когда спонтанное тепловое возбуждение не учитывается ($\lambda = 0$) и при $K = 0,3$; $b = 0$; $0,1$, области соответствующих значений параметров N и α показаны на рисунке, где сплошные кривые даны для $b = 0$, а пунктирные для $b = 0,1$.

На рисунке хорошо видно влияние шума спонтанного излучения, попадающего в рабочую моду резонатора, на диапазон параметров реализации того или иного режима. Следует отметить, что в режимах, соответствующих линии на рисунке, разделяющей устойчивые узлы и устойчивые фокусы, реализуется минимальное время переходного процесса при импульсной модуляции излучения лазера.

Параметр N в лазерах можно оценить, учитывая, что $N \sim D \sim j$, и зная плотность тока j и ее зависимость от приложенного к диоду напряжения.

Полученные в настоящей работе закономерности позволяют установить влияние шумов, интенсивность которых определяется параметром b , вызванных спонтанным излучением, попадающим в рабочую моду резонатора, на характер устойчивости генерации полупроводниковых инжекционных лазеров, в том числе и при наличии реальных условий повышения температуры, характеризующихся параметром λ .



Диаграммы областей устойчивости, показывающие влияние шума спонтанного излучения

Литература

1. Ривлин Л.А. Динамика излучения полупроводниковых квантовых генераторов. – М.: Сов. радио, 1976. – 176 с.
2. Богданкевич О.В., Дарзбек С.А., Елисеев П.Г. Полупроводниковые лазеры. – М.: Наука, 1976. – 415 с.
3. Ривлин Л.А., Семенов А.Т., Якубович С.Д. Динамика и спектры излучения полупроводниковых лазеров. – М.: Радио и связь, 1983. – 208 с.
4. Полупроводниковые инжекционные лазеры. Динамика, модуляция, спектры: Пер. с англ. / Под ред. Л.А.Ривлина. – М.: Радио и связь, 1990. – 320 с.
5. Мальшев В.А. Анализ переходных процессов в лазерных автогенераторах // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1992. – Т. 35, № 5–6. – С. 45–49.
6. Мальшев В.А. Квазилинейная теория инверсной населенности полупроводниковых лазеров // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 1999. – № 5. – С. 3–10.
7. Тарасов Л.В. Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения. – М.: Радио и связь, 1981. – 440 с.
8. Stutz H., De Mars G. Transients and oscillation pulses in masers // Quantum Electronics / Ed. by S.H.Townes. – N. Y.: Columbia Univ. Press., 1960. – P. 530–538.

Статья поступила
после доработки
16 мая 2007 г.

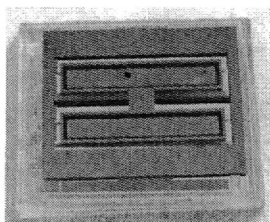
Мальшев Владимир Александрович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиотехнической электроники ТТИ ЮФУ. *Область научных интересов:* микроволновая и квантовая электроника и микроэлектроника.

Михайлов Николай Александрович – аспирант кафедры радиотехнической электроники ТТИ ЮФУ. *Область научных интересов:* микроволновая и квантовая электроника и микроэлектроника.

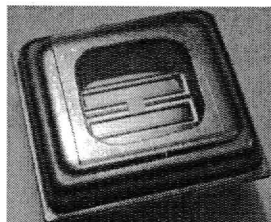
Московский государственный институт электронной техники (технический университет)

Кафедра микроэлектроники

Микромеханическое зеркало



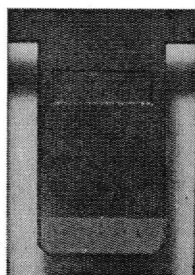
Чувствительный элемент
микромеханического зеркала



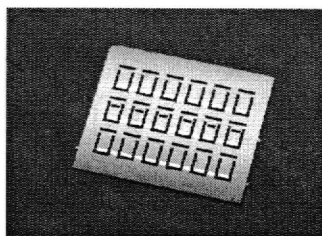
Назначение:

- сканирование;
- позиционирование;
- стабилизация оптической линии визуирования;
- управление оптическими ключами;
- портативные дисплеи;
- формирование изображений высокой четкости.

Микрореле



Чувствительный элемент микрореле



Назначение:

- микропереключатели;
- коммутаторы (робототехника, управляющие устройства в космической области, в биомедицине и др.);
- применение в СВЧ-технике.

Наш адрес: 124498, Москва, г. Зеленоград, проезд 4806, д.5

e-mail: spt@mice.ru
тел.: +7 (495) 532-99-62
тел.: +7 (495) 532-99-68

МИКРОСИСТЕМЫ

УДК 681.586

Методика оценки параметров чувствительных элементов микроакселерометров и микрозеркал

С.П.Тимошенков, А.Н.Бойко, Б.М.Симонов

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Представлены результаты применения исследовательской методики, разработанной для измерения параметров микромеханических элементов. Данная методика совместно с результатами расчетов была использована для определения параметров экспериментальных образцов микрозеркал.

Микроэлектромеханические приборы и системы (МЭМС) включают в свой состав такие устройства, как микродатчики и микроприводы, способные реагировать на изменение окружающей среды, используя для этого внутренние средства управления [1]. Наиболее распространенными являются микросистемы, которые содержат следующие структуры: диафрагмы, консоли и мостовые схемы. Для изготовления мембран, консольных балок, резонансных структур и т.п. используются специальные технологии. На основе этих трех основных структур можно реализовать практически любые микродатчики и микроприводы для работы в составе интеллектуальных устройств. Известны микромеханические датчики давления, принцип действия которых основан на зависимости собственной частоты колебаний резонансной структуры от давления [2].

В настоящей работе представлены результаты применения исследовательской методики, разработанной для определения параметров микромеханических элементов. Данная методика была использована для измерений параметров экспериментальных образцов микрозеркал. Представлены также результаты расчетов достигаемых углов и амплитуд отклонений при механических воздействиях на чувствительный элемент микроакселерометра или микрозеркала.

Принцип действия исследованных датчиков основан на зависимости параметров микромеханического осциллятора – добротности и частоты собственных колебаний от давления. В устройстве обработки электрических сигналов, поступающих от датчика, реализованы емкостная система съема сигнала и электростатический способ формирования усилия для реализации обратной связи. Чувствительный элемент датчика представляет собой кремниевую пластину, подвешенную на упругих торсионах.

Для оценки влияния газового демпфирования на добротность микроэлектромеханических осцилляторов проведено компьютерное моделирование в среде ANSYS [3], представляющей собой набор программных пакетов для решения обширного класса задач методом конечно-элементного анализа.

Решение задач с помощью программы ANSYS состоит из трех этапов: препроцессорная (предварительная) подготовка; получение решения; постпроцессорная обработка результатов. На стадии препроцессорной подготовки выполняются выбор типа расчета, построение модели и приложение нагрузок (включая и граничные условия), задаются необходимые для решения исходные данные, выбираются координатные системы и типы конечных элементов, указываются упругие постоянные и физико-механические свойства материалов, строятся твердотельная модель и сетка конечных

элементов, выполняются необходимые действия с узлами и элементами сетки, задаются уравнения связи и ограничения. Этап решения задачи включает в себя задание вида анализа и его опций, нагрузок, шага решения и заканчивается запуском процесса решения конечно-элементной задачи. С помощью постпроцессорных средств программы результаты решения обрабатывались и представлялись в графическом или табличном виде. Итогом работы программы на постпроцессорной стадии является графическое и (или) табличное представление результатов.

При создании модели, пригодной для описания поведения газовой пленки между двумя движущимися поверхностями, используется линеаризованное уравнение Рейнольдса для сжатых газовых пленок [4, 5]:

$$\frac{d^3}{12\eta} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) = \frac{d}{P_0} \frac{\partial P}{\partial t} + v_z,$$

где P – изменяющееся давление; x, y – координаты; η – динамическая вязкость; d – величина зазора; P_0 – давление окружающей среды; t – время; v_z – скорость движущейся платы в нормальном направлении.

При описании демпфирования сжатыми газовыми пленками вводится число Кнудсена

$$Kn = \frac{L_0 P_{ref}}{Pd},$$

здесь L_0 – длина свободного пробега молекулы; P_{ref} – давление, при котором длина свободного пробега равна L_0 .

Для систем с большим числом Кнудсена ($Kn > 0,01$), т.е. при малых зазорах, что имеет место в нашем случае, определяется эффективная вязкость. Выражение для эффективной вязкости, полученное на основе экспериментов, имеет следующий вид [6]:

$$\eta_{eff} = \frac{\eta}{1 + 9,638 \left(\frac{L_0 P_{ref}}{Pd} \right)^{1,159}}.$$

При проведении расчетов имеется возможность учета коэффициента аккомодации α для каждой из поверхностей (для кремния $\alpha = 0,8-0,9$).

Таким образом, исходными данными при проведении расчетов будут: величина зазора; размеры пластин; коэффициенты аккомодации поверхностей; эталонное давление; длина свободного пробега при эталонном давлении; динамическая вязкость газа.

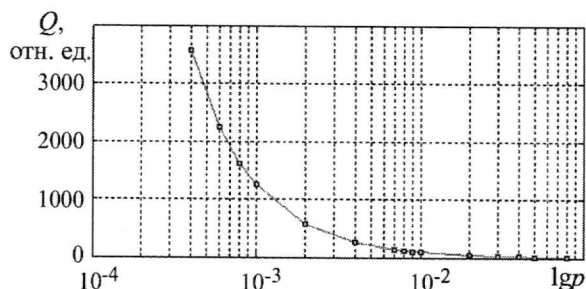


Рис.1. Расчетная зависимость добротности колебательной системы датчика Q от давления p

Составлена программа, позволяющая выполнить расчет добротности согласно приведенной модели.

При расчетах используются следующие исходные значения параметров: размер пластины $5,2 \times 5$ мм; величина зазора 10 мкм; давление окружающей среды $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. На рис.1 представлена расчетная зависимость добротности колебательной системы от давления.

Проведенные расчеты позволили установить влияние газового демпфирования на добротность микроосцилляторов. Полученные результаты необходимы для прогнозирования точностных характеристик микромеханических устройств, а также для разработки и оптимизации параметров микромеханических датчиков давления осцилляторного типа.

Были проведены исследования параметров разработанных и изготовленных микромеханических датчиков давления осцилляторного типа. Чувствительные элементы датчиков изготавливались из монокристаллического кремния с использованием глубокого анизотропного травления (рис.2).

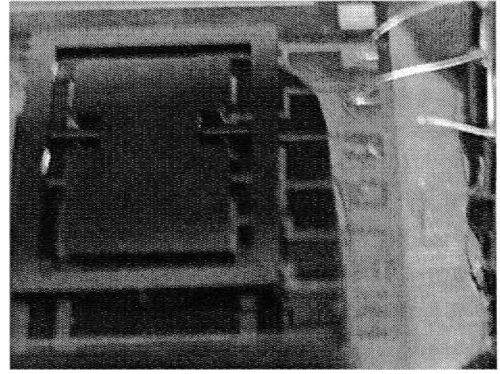


Рис.2. Фотография чувствительного элемента микромеханического датчика давления

Определены зависимости добротности и собственных частот осцилляторов для 1-й и 2-й мод их колебаний от давления в диапазоне $2 \cdot 10^{-1} - 5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. с помощью специально разработанной методики [7]. Метод расчета добротности состоит в измерении времени затухания свободных колебаний, возникающих после кратковременного воздействия на колебательную систему возбуждающего импульса. Выходные сигналы датчиков записывались с помощью специализированной цифровой платы сбора и обработки данных L-Card, пакетов стандартных программ Lab-View, Matlab, а также разработанного специализированного программного обеспечения.

Зависимости измеренных параметров от давления определены для датчиков давления двух типов: первого – с жесткостью торсионов $3,7 \cdot 10^{-5}$ Н/м; второго – с жесткостью торсионов $1 \cdot 10^{-4}$ Н/м. Результаты измерений представлены в таблице.

Результаты измерений добротности и собственной частоты колебаний датчиков давления двух типов

Тип датчика	Давление p , мм рт. ст.	1-я мода колебаний		2-я мода колебаний	
		f_1	Q_1	f_2	Q_2
Первый	$2 \cdot 10^{-1}$	-	-	3303,43	87
	$5 \cdot 10^{-2}$	216,72	8,2	3293,99	680
	$2 \cdot 10^{-2}$	215,62	30	3292,37	1047
	$6 \cdot 10^{-3}$	212,05	124	3291,32	1762
	$1 \cdot 10^{-3}$	214,95	680	3290,93	2178
	$5 \cdot 10^{-4}$	214,86	1252	3290,84	2190
	$5 \cdot 10^{-5}$	214,86	3540	3290,84	2232
Второй	$2 \cdot 10^{-1}$	371,74	3,1	4620,74	212
	$6 \cdot 10^{-2}$	368,02	15	4607,11	444
	$2 \cdot 10^{-2}$	367,16	58	4601,32	748
	$6 \cdot 10^{-3}$	366,87	337	4599,38	965
	$1 \cdot 10^{-3}$	366,87	850	4599,09	1012
	$5 \cdot 10^{-4}$	366,87	2619	4597,66	1257
	$5 \cdot 10^{-5}$	366,87	11013	4597,56	1250

Полученные результаты измерений позволяют сделать вывод о зависимости добротности исследованных образцов датчиков давления от частоты.

Образцы датчиков первого типа чувствительны к широкому диапазону изменения давления. По 1-й моде (~215 Гц) образцы чувствительны к изменению давления в диапазоне $6 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст., по 2-й моде (~3300 Гц) образцы чувствительны в диапазоне $2 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.

Образцы датчиков давления второго типа также чувствительны к широкому диапазону изменения давления. По 1-й моде колебаний (~366 Гц) образцы чувствительны к изменению давления в диапазоне $2 \cdot 10^{-1} - 5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст., по 2-й моде (~4600 Гц) – в диапазоне $2 \cdot 10^{-1} - 9 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.

На основе полученных экспериментальных данных определена эмпирическая зависимость добротности колебательной системы от давления:

$$Q(p) = \frac{k_1}{p^c} + b_1, \tag{1}$$

где Q – добротность колебательной системы; p – давление; k_1, b_1, c – константы, определяемые конструкцией чувствительного элемента (ЧЭ) датчика давления, величиной зазора, а также конструкционным и электронным демпфированием.

Зависимость частоты колебаний осцилляторов от давления аппроксимируется линейной функцией вида

$$f(p) = k_2 p + b_2, \tag{2}$$

где f – частота колебаний осциллятора; k_2, b_2 – константы, зависящие от конструкции ЧЭ и величины зазора. Коэффициент k_2 характеризует дополнительную жесткость, вносимую сжимаемой газовой пленкой при колебаниях осциллятора, b_2 соответствует собственной частоте колебаний осциллятора в абсолютном вакууме.

Разработана программа в среде математического моделирования MatLab, позволяющая упростить поиск коэффициентов аппроксимации.

Для 1-й моды колебаний датчиков обоих типов $c = 0,5$ и выражение (1) принимает вид

$$Q(p) = \frac{k_1}{p^{0,5}} + b_1. \tag{3}$$

Для датчиков первого типа $k_1 = 27, b_1 = -123$, второго типа $k_1 = 47, b_1 = -149$. На рис.3 представлены полученные экспериментально и рассчитанные с помощью эмпирических соотношений зависимости $Q(p)$ на 1-й моде колебаний, а также результаты расчета согласно выражению (3) для датчиков первого и второго типа соответственно.

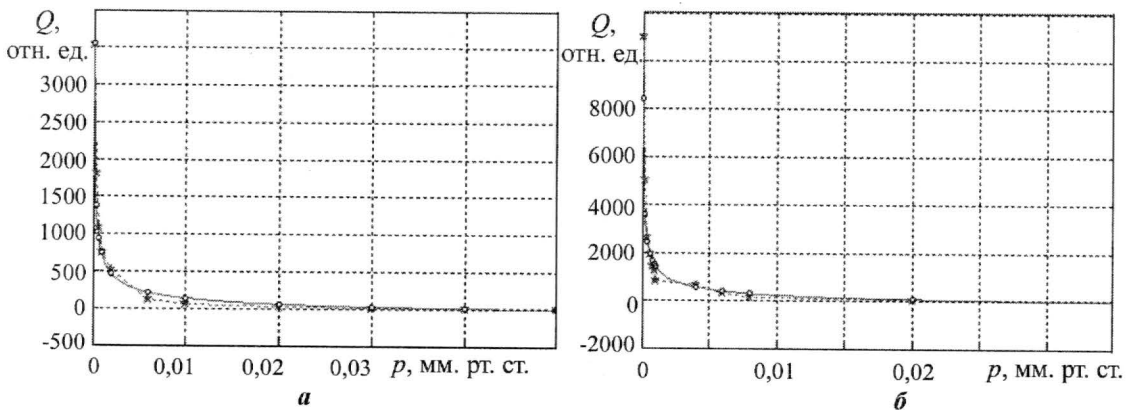


Рис.3. Зависимость $Q(p)$ для датчиков первого (а) и второго (б) типов на 1-й моде колебаний: —★— экспериментальные значения; —○— результаты расчета

При колебаниях на 2-й моде для датчиков первого и второго типа выражение (1) принимает вид

$$Q(p) = \frac{k_1}{p^{0,001}} + b_1. \quad (4)$$

Для датчиков первого типа $k_1 = 4,367 \cdot 10^5$, $b_1 = -4,374 \cdot 10^5$; для датчиков второго типа $k_1 = 1,7959 \cdot 10^5$, $b_1 = -1,7964 \cdot 10^5$. На рис.4 представлены зависимости $Q(p)$ на 2-й моде колебаний и результаты расчета согласно выражению (4) для датчиков первого и второго типа соответственно.

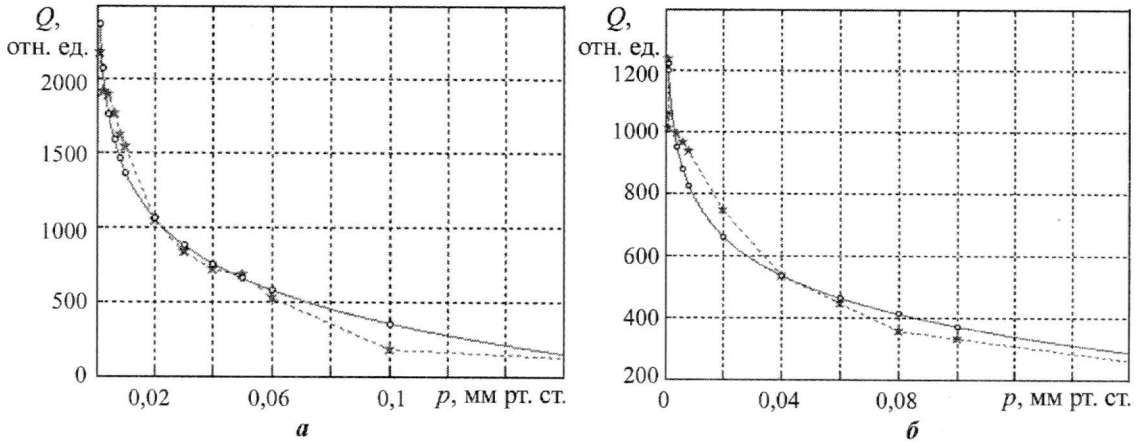


Рис.4. Зависимость $Q(p)$ для датчиков первого (а) и второго (б) типов на 2-й моде колебаний: —★— экспериментальные значения; —○— результаты расчета

Зависимость $Q(p)$ при колебаниях на 2-й моде определяется выражением (4) при $p < 9 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. для датчиков и первого и второго типа. При $p > 9 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. добротность перестает зависеть от давления, что, по-видимому, связано с уменьшением роли газового демпфирования и преобладанием других механизмов рассеяния колебательной энергии осцилляторов. Раскрытие этих механизмов, таких как конструкционное и электронное демпфирование [8], представляется важным с теоретической и практической точек зрения и требует дальнейших исследований.

На рис.5–8 представлены результаты аппроксимации зависимости $f(p)$ уравнением вида (2) для датчиков первого и второго типа.

Анализ полученных зависимостей добротности и собственных частот колебаний датчиков давления осцилляторного типа показал применимость подобных устройств для измерения давления в диапазоне $2 \cdot 10^{-1} - 5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.

Проведенное с помощью программного комплекса ANSYS моделирование и выполненные расчеты позволили установить влияние газового демпфирования на добротность микромеханических осцилляторов.

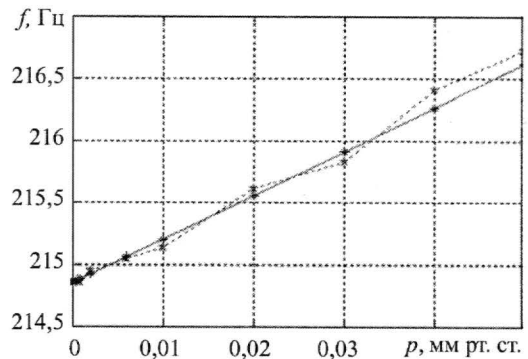


Рис.5. Зависимость $f(p)$ для датчиков первого типа на 1-й моде колебаний: —★— результаты эксперимента; —*— результаты аппроксимации уравнением вида $f(p) = 35,33 \cdot p + 214,85$

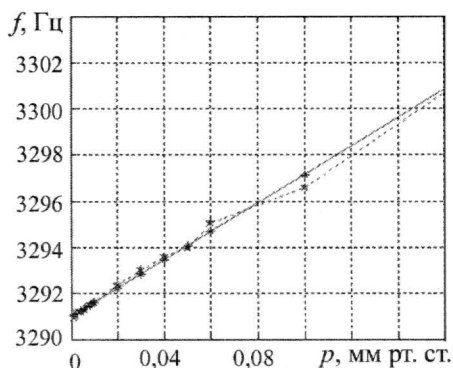


Рис.6. Зависимость $f(p)$ для датчиков первого типа на 2-й моде колебаний: ---★--- результаты эксперимента; —*— результаты аппроксимации уравнением вида $f(p) = 61,49 \cdot p + 3291$

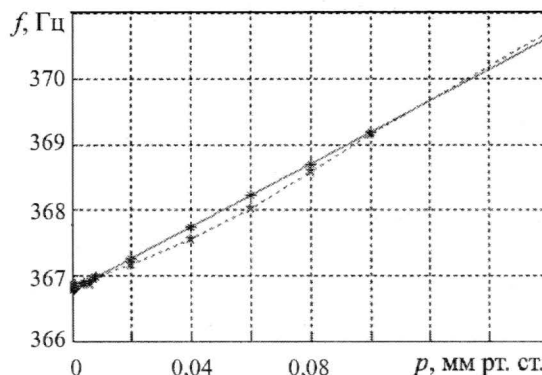


Рис.7. Зависимость $f(p)$ для датчиков второго типа на 1-й моде колебаний: ---★--- результаты эксперимента; —*— результаты аппроксимации уравнением вида $f(p) = 23,9 \cdot p + 366,78$

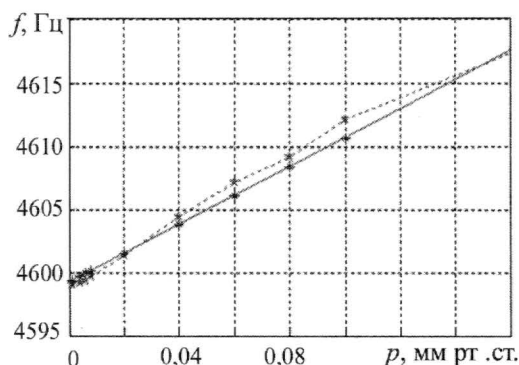


Рис.8. Зависимость $f(p)$ для датчиков второго типа на 2-й моде колебаний: ---★--- результаты эксперимента; —*— результаты аппроксимации уравнением вида $f(p) = 114,4 \cdot p + 4599,3$

Полученные данные могут быть использованы при проектировании и изготовлении микроэлектромеханических датчиков давления. Расчеты показали, что добротность разработанной колебательной системы сильно зависит от давления – при давлении выше $1 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст. добротность стремится к нулю.

Экспериментальные зависимости добротности и собственных частот колебаний показали достаточно высокую чувствительность датчиков давления осцилляторного типа и их пригодность для измерения давления в диапазоне $2 \cdot 10^{-1} - 5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.

Установлены эмпирические зависимости параметров чувствительного элемента датчика – добротности и собственной частоты от давления газовой среды. Определены диапазоны давлений газовой среды ($2 \cdot 10^{-1} - 5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.), измеряемых чувствительным элементом датчика на разных модах колебаний.

Литература

1. Варадан В., Виной К., Джозе К. ВЧ МЭМС и их применение. – М.: Техносфера, 2004. – 528 с.
2. Melin J. A low-pressure encapsulated deep reactive ion etched resonant pressure sensor electrically excited and detected using 'burst' technology // Micromech. Microeng. – 2000. – N 10. – P. 209–217.
3. Канлун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: практическое руководство. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
4. Blech J.J. On Isothermal Squeeze Films // J. of Lubrication Technology. – 1983. – Vol. 105. – P. 615–620.
5. A Study of Squeeze-film Damping / Griffin, W. S., et al. // J. of Basic Engineering. – 1966. – P. 451–456.
6. Veijola T. Equivalent circuit models for micromechanical inertial sensors // Circuit Theory Laboratory Report Series CT-39. – Helsinki University of Technology, 1999. – <http://www.ct.tkk.fi/publications/ct-39.pdf>

7. Исследование влияния эксплуатационных факторов на функциональные параметры и характеристики микроэлектромеханических устройств / *С.П.Тимошенко, В.Ф.Шилов, А.Н.Бойко и др.* // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2006. – № 2. – С. 7–12.

8. Quality Factors of MEMS Gyros and the Role of Thermoelastic Damping / *A. Duwel, J. Gorman, M. Weinstein et al.* // 15-th IEEE International Conf. on Microelectromechanical Systems (January 20–25, 2002). – 2002. – P. 214–219.

Статья поступила после доработки
11 октября 2006 г.

Тимошенко Сергей Петрович – доктор технических наук, заведующий кафедрой микроэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* микросистемная техника, структуры кремний на изоляторе.

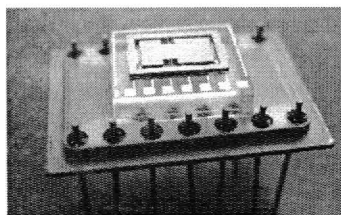
Бойко Антон Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры микроэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* микросистемная техника.

Симонов Борис Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры микроэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* микросистемная техника.

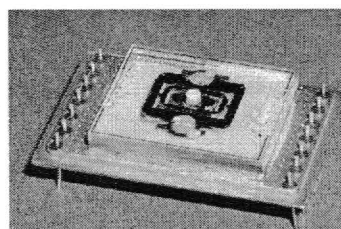
**Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)
Кафедра микроэлектроники**

Микромеханические акселерометры и гироскопы

Области применения: - **космос** (системы навигации и ориентации);



Чувствительный элемент
микроакселерометра



Чувствительный элемент
микрогироскопа

- **оборонная промышленность** (системы определения курса, тангажа и крена);
- **автомобилестроение** (активная подвеска, автоматическое управление, навигация, системы безопасности, контроль движения, системы контроля за давлением в шинах);
- **строительная техника** (определение наклона, напряжений и деформаций конструкций, профиля дорог и магистралей);
- **геологоразведка и добыча полезных ископаемых;**
- **сейсмические исследования** (определение вибраций, ударов и других механических воздействий);
- **робототехника** (датчики и системы контроля кинематических параметров движения манипуляторов);
- **потребительская электроника;**
- **бытовая техника** (стабилизация, системы контроля бытовых приборов);
- **спорт** (контроль параметров движения спортсмена, спортивные тренажеры);
- **медицина** (реабилитационные тренажеры, активные протезы, система навигации и ориентации для слепых).

Наш адрес: 124498, Москва, г. Зеленоград, проезд 4806, д.5

e-mail: spt@miee.ru
тел.: +7 (495) 532-99-62
тел.: +7 (495) 532-99-68

Анализ влияния анизотропных свойств материала на собственные частоты кольцевых резонаторов микромеханических гироскопов

С.А.Зотов

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Описана конструкция кольцевого резонатора МЭМС-гироскопа и приведена математическая модель его динамики. Исследовано влияние анизотропных свойств конструктивного материала на собственные частоты кольцевого резонатора МЭМС-гироскопа и на погрешности прибора.

На сегодняшний день одним из основных направлений развития навигационной и гироскопической техники является разработка микромеханических гироскопов (ММГ).

МЭМС-преобразователи, имеющие в своем составе кремниевые исполнительные элементы, обладают рядом значительных преимуществ по сравнению с известными приборами того же функционального назначения, выполненными по традиционной технологии. Это обеспечивается использованием при проектировании таких устройств материаловедческой и технологической баз современной твердотельной микроэлектроники. МЭМС-преобразователи обладают высоким быстродействием, имеют значительно меньшую стоимость, меньшие габариты, больший спектр применения, невысокое энергопотребление, высокую ударо- и вибропрочность.

Практически полная технологическая совместимость механической части датчика и сервисной электроники позволяют создавать чипы гироскопов объемом 0,5–10 см³ с потребляемой мощностью 0,5–1 Вт. В качестве примеров микромеханических инерциальных датчиков, уже освоенных в производстве, можно назвать кремниевые ММГ и микроакселерометры фирмы Rockwell International, разработанные в лаборатории им. Ч. Дрейпера (США); кварцевые ММГ и микроакселерометры фирмы Systron Donner (США); пьезокерамические ММГ фирмы Murata (Япония), а также Litton, Sagem, Northrop, Honeywell Kearfott, Delco, Ferranti, Bosch, Mitsubishi, Gyrostar, Analog Devices, Watson Industries.

INTEL, Endevco, Motorola, National Semiconductor, Texas Instruments, RCA, Bendix и др. разработали свыше 3000 интегральных датчиков различного применения. Не меньших результатов достигли специализированные электронные фирмы Японии, а также западной Европы, например Nakuto Ltd, Matsushita Electric, Hitachi, Fuji Electric, Tokuo Keiso, Jeco corp., Sharp corp., Mazda corp., Nok corp., Yokogawa Electric, Nissan Electric (Япония), Jager, Sumecora, Exera, Schlumberger (Франция), BAE Systems, Lucas, Sirex (Англия), Magneti-Marelli (Италия), Philips (Нидерланды), Bruel & Kjer (Дания), Krupp (Германия).

Среди отечественных фирм, занимающихся разработкой подобных датчиков, следует выделить ЦНИИ машиностроения, НИИ прикладной механики им.В.И. Кузнецова, НПК «Вектор», МИЭТ, РПКБ, НИИ командных приборов, Центр микротехники и диагностики России, ГУАП, АОЗТ «Гирооптика», НПП «Темп-Авиа».

Микромеханические гироскопы начинают применяться в интегрированных системах ориентации и навигации объектов различного назначения. Таким образом, достижения в области микромеханики позволяют успешно решать ряд задач и проблем, стоящих перед отечественными предприятиями.

Основным узлом ММГ, определяющим точность прибора, является его чувствительный элемент (ЧЭ). При производстве чувствительных элементов микромеханических датчиков применяют высокочастотные неметаллические материалы (монокристаллический кремний, плавленый кварц, пьезокристаллы). В настоящей работе проведено исследование влияния механических свойств анизотропных материалов на частоту собственных колебаний ЧЭ кольцевого вибрационного гироскопа.

Конструкция ЧЭ кольцевого вибрационного гироскопа. На рис.1 представлена конструкция ЧЭ кольцевого вибрационного гироскопа, разработанного ВАЕ [1].

Резонатор представляет собой кремниевое кольцо диаметром 6 мм, которое поддерживается восемью радиально упругими подвесами, фиксированными в основании. Все элементы ЧЭ имеют вертикальные боковые стенки. Токпроводящий слой формируется на верхней поверхности всего чипа. Внешние контактные площадки для проводного соединения располагаются на основании.

На поверхности чипа формируются восемь идентичных токпроводящих петель, изолированных от подложки, каждая из которых в виде токпроводящей шины начинается от контактной площадки, далее следует вдоль поверхности подвеса, затем вокруг 1/8 сегмента кольца, вдоль поверхности следующего подвеса и заканчивается на другой контактной площадке. Каждый подвес, таким образом, содержит два проводника, между которыми располагается третий проводник, соединенный с контактной площадкой, которая образует электрическое соединение с металлизацией основания (земля). Назначение третьего проводника – минимизировать емкостную связь между двумя проводниками смежных петель. Кремниевая подложка также заземлена. Для изготовления ЧЭ используются пластины монокристаллического кремния.

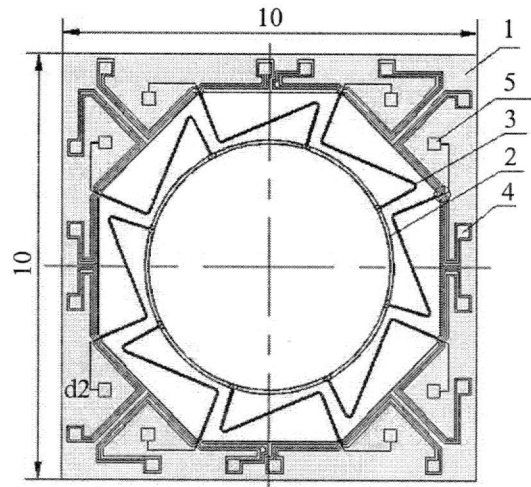


Рис.1. Чувствительный элемент микромеханического гироскопа: 1 – основание, 2 – резонатор (кольцо), 3 – подвесы, 4 – контактные площадки токпроводящих шин, 5 – контактные площадки экранирующих токпроводящих шин

Математические модели динамики ЧЭ кольцевого вибрационного гироскопа. Динамика изотропного кольцевого резонатора на вращающемся основании подробно изучена [1, 2].

Однородное уравнение плоских колебаний кольцевого резонатора на равномерно вращающемся основании [2] имеет вид

$$\frac{\partial^4 w}{\partial \varphi^2 \partial t^2} - \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + 4\Omega \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi \partial t} + \frac{EJ}{\rho SR^4} \left(\frac{\partial^6 w}{\partial \varphi^6} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial \varphi^4} + \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} \right) = 0, \quad (1)$$

где w – радиальное смещение сечения; φ – угловая координата; Ω – угловая скорость вращения; E – модуль Юнга; J – момент инерции сечения; ρ – объемная плотность; R – радиус; S – площадь поперечного сечения.

Решение уравнения (1) представим в виде

$$w = C_1 \cos \left(nx \pm \frac{2\gamma\Omega + n\sqrt{4\gamma^2\Omega^2 + \gamma(n^6 - n^4 - n^2 + 1)}}{\gamma(n^2 + 1)} t + C_2 \right), \quad (2)$$

откуда следует выражение для собственных частот кольцевого резонатора

$$\omega = \frac{2\gamma\Omega + n\sqrt{4\gamma^2\Omega^2 + \gamma(n^6 - n^4 - n^2 + 1)}}{\gamma(n^2 + 1)}, \quad (3)$$

где $\gamma = \frac{\rho SR^4}{EJ}$; n – номер формы колебания кольца ($n = 2, 3, \dots$).

На рис.2 приведены вторая, третья и четвертая формы колебаний кольцевого резонатора.

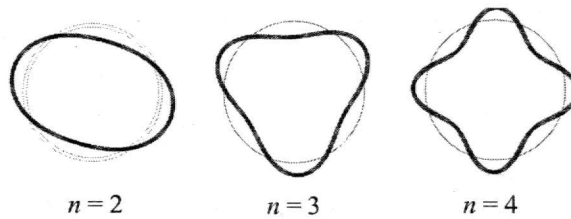


Рис.2. Формы колебаний кольцевого резонатора

Однородное уравнение анизотропного кольца на неподвижном основании имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{R^4} \frac{\partial^3}{\partial \varphi^3} \left[E(\varphi) J(\varphi) \left(\frac{\partial v}{\partial \varphi} + \frac{\partial^3 v}{\partial \varphi^3} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[E(\varphi) J(\varphi) \left(\frac{\partial v}{\partial \varphi} + \frac{\partial^3 v}{\partial \varphi^3} \right) \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[m_0(\varphi) \frac{\partial^2 v}{\partial \varphi \partial t^2} \right] - m_0(\varphi) \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где v – тангенциальное перемещение сечения кольца.

Уравнение (4) сведем к обыкновенному дифференциальному уравнению для определения собственной частоты p :

$$\begin{aligned} & \frac{1}{R^4} \frac{\partial^3}{\partial \varphi^3} \left[E(\varphi) J(\varphi) \left(\frac{\partial \xi}{\partial \varphi} + \frac{\partial^3 \xi}{\partial \varphi^3} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[E(\varphi) J(\varphi) \left(\frac{\partial \xi}{\partial \varphi} + \frac{\partial^3 \xi}{\partial \varphi^3} \right) \right] - \\ & - p^2 \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[m_0(\varphi) \frac{\partial \xi}{\partial \varphi} \right] + p^2 m_0(\varphi) \xi = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где ξ – функция соответствующей формы.

Далее полагаем, что $m_0 = \text{const}$ и $J = \text{const}$, в силу этого уравнение (5) перепишем в виде

$$\frac{J}{R^4} \frac{\partial^3}{\partial \varphi^3} \left[E(\varphi) \left(\frac{\partial \xi}{\partial \varphi} + \frac{\partial^3 \xi}{\partial \varphi^3} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[E(\varphi) \left(\frac{\partial \xi}{\partial \varphi} + \frac{\partial^3 \xi}{\partial \varphi^3} \right) \right] - p^2 m_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial \varphi^2} + p^2 m_0 \xi = 0. \quad (6)$$

Решение данного уравнения будем искать методом Галеркина.

Функцию формы представим в виде ряда

$\xi = \sum_{i=1} \xi_i \cos(ni(\varphi + \varphi_0))$, где n – номер формы колебаний.

Отметим, что модуль Юнга E анизотропных материалов есть периодическая функция направления, например модуль Юнга Si в плоскости (100) определяется зависимостью [4]

$$E = \frac{1}{\lambda - 0,25\lambda_A(1 - \cos 4\theta)}$$

где λ и λ_A – коэффициенты податливости (рис.3). Это позволяет представить E в виде ряда $E = E_0 + \sum_{j=1} E_j \cos(kj\varphi)$. Число k определяет

форму анизотропии и численно равно количеству максимумов (или минимумов) функции $E(\varphi)$ при $\varphi = [0, 2\pi]$ или количеству осей симметрии.

Для определения собственной частоты колебания необходимо сформировать характеристическую матрицу, каждая строка которой определяется следующим интегралом:

$$\int_0^{2\pi} \left(\frac{J}{R^4} \frac{\partial^3}{\partial \varphi^3} \left[E(\varphi) \left(\frac{\partial \xi}{\partial \varphi} + \frac{\partial^3 \xi}{\partial \varphi^3} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[E(\varphi) \left(\frac{\partial \xi}{\partial \varphi} + \frac{\partial^3 \xi}{\partial \varphi^3} \right) \right] - p^2 m_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial \varphi^2} + p^2 m_0 \xi \right) \xi_i \cos(ni\varphi + \varphi_0) d\varphi. \quad (7)$$

Отметим, что для соотношения $ni \neq 2kj$ значение интеграла (7) определяется выражением

$$-\frac{\pi \xi_i (Jk^2 E_0 + 2Jk^4 E_0 + p^2 m_0 R^4 - Jk^6 E_0 + p^2 m_0 k^2 R^4)}{R^4}$$

и не зависит от начальной фазы φ_0 и E_j . Напротив, если выполняется соотношение $ni = 2kj$, то значение интеграла равно

$$-\frac{\pi \xi_i (Jk^2 E_0 + 2Jk^4 E_0 + p^2 m_0 R^4 - Jk^6 E_0 + p^2 m_0 k^2 R^4)}{R^4} + \frac{\pi \xi_i E_j}{R^4} \left\{ (-2Jk^4 + Jk^6 + Jk^2) \cos^2(k\varphi_0) - \frac{(-2Jk^4 + Jk^6 + Jk^2)}{2} \right\}, \quad (8)$$

и зависит от φ_0 и E_j .

Учитывая, что интеграл (7) обуславливает элементы характеристической матрицы при определении собственных частот для данной формы колебаний, можно сделать ряд выводов о влиянии анизотропных свойств материалов на частоту собственных колебаний для определенной формы колебаний кольцевого резонатора. Данное влияние опре-

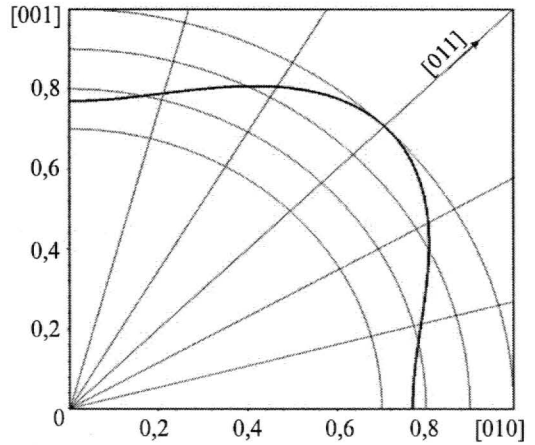


Рис.3. Зависимость модуля Юнга монокристаллического кремния в плоскости (100) от угла ориентации от кристаллографической оси [010]

деляется порядком малости сомножителя $\xi_i E_j$ при $\cos^2(k\varphi_0)$ в выражении (8) по сравнению с величиной $\xi_i E_0$. Порядок малости величины $\xi_i E_j$ определяет зависимость собственной частоты колебания резонатора при развороте данной формы колебаний относительно кристаллографических осей.

В частности, проанализируем кольцевой резонатор из кремния в кристаллографической плоскости (100) ($k=4$) (см. рис.3). Для данной плоскости запишем разложение модуля Юнга в ряд $E = E_0 + E_1 \cos(4\varphi) + E_2 \cos(8\varphi) + E_3 \cos(12\varphi) + \dots$. Рассмотрим зависимость частоты колебаний данного резонатора от кристаллографического направления для второй формы колебания ($n=2$). Вторую форму колебаний представим в виде разложения $\xi = \xi_1 \cos(2\varphi) + \xi_2 \cos(4\varphi) + \xi_3 \cos(6\varphi) + \dots$. Соотношения $n_i = 2k_j$ выполняются для $i=1; j=1; i=2; j=2; \dots$ (соответственно для членов разложения $E_1 \cos(4\varphi)$, $\xi_1 \cos(2\varphi)$; $E_2 \cos(8\varphi)$, $\xi_2 \cos(6\varphi)$). Следовательно, в характеристической матрице будут присутствовать члены, содержащие $\cos^2(k\varphi_0)$ с коэффициентом $\xi_1 E_1, \xi_2 E_2, \dots$, т.е. члены в характеристической матрице, зависящие от φ_0 , имеют первый порядок малости. Таким образом, изменение частоты будет иметь тот же порядок, что и сама частота. В качестве примера на рис.4 приведена зависимость собственной частоты второй формы колебаний от кристаллографического направления в плоскости (100) для кремниевого кольцевого резонатора радиуса 6 мм с шириной кольца 115 мкм.

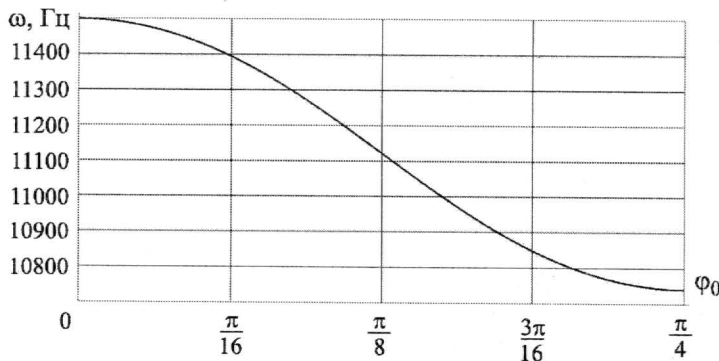


Рис.4. Зависимость собственной частоты второй формы колебаний от кристаллографического направления в плоскости (100) (0 соответствует колебаниям в направлении [001], $\pi/4$ – [011])

Зависимость собственной частоты от кристаллографического направления для рабочей формы колебаний приведет к постоянной составляющей в сигнале гироскопа, т.е. данная зависимость определяет величину дрейфа нулевого сигнала датчика. Таким образом, при проектировании кольцевых резонаторов необходимо сводить к минимуму влияние собственной частоты от кристаллографического направления.

Рассмотрим третью форму колебаний ($n=3$, $\xi = \xi_1 \cos(3\varphi) + \xi_2 \cos(6\varphi) + \xi_3 \cos(9\varphi) + \dots$) для кристаллографической плоскости (100) ($k=4$, $E = E_0 + E_1 \cos(4\varphi) + E_2 \cos(8\varphi) + E_3 \cos(12\varphi) + \dots$). Соотношения $n_i = 2k_j$ выполняются для $i=2, j=3, \dots$ (соответственно для членов разложения $\xi_2 \cos(6\varphi)$ и $E_3 \cos(12\varphi)$ и т.д.). Следовательно, в характеристической матрице будут присутствовать члены, содержащие $\cos^2(k\varphi_0)$ с коэффициентом $\xi_2 E_3, \dots$, т.е. члены в характеристической матрице, зависящие от φ_0 ,

имеют шестой порядок малости. Таким образом, частота будет инвариантна направлению кристаллографических осей (очевидно шестым порядком малости можно пренебречь).

Рассуждая аналогично, можно показать, что изменение частоты от кристаллографического направления будет иметь второй порядок малости для четвертой формы колебаний при симметрии изгибной жесткости по четырем направлениям ($k = 4$, такую симметрию имеет плоскость Si (100)).

В общем случае порядок малости изменения частоты от кристаллографического направления определяется произведением наименьших натуральных чисел i и j , для которых выполняется соотношение $ni = 2kj$.

В заключение отметим, что сама система подвеса вносит в кольцевой резонатор анизотропию по изгибной жесткости. Например, система подвеса резонатора, приведенного на рис.1, вносит анизотропию изгибной жесткости с симметрией по 8 направлениям. При этом изменение частоты от кристаллографического направления для второй формы колебаний будет иметь второй порядок малости, для третьей – двенадцатый, а для четвертой – первый.

Литература

1. *Fountain Richard*. Characteristics and Overview of a Silicon Vibrating Structure Gyroscope // Advances in Navigation Sensors and Integration Technology. – 2004. – 226 с.
2. *Журавлев В.П., Климов Д.М.* Волновой твердотельный гироскоп. – М.: Наука, 1985. – 150 с.
3. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур / *Ю.А. Концевой и др.* – М.: Машиностроение, 1982. – 240 с.

Статья поступила
18 апреля 2007 г.

Зотов Сергей Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры микроэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* расчеты и проектирование чувствительных элементов МЭМС.

Информация для читателей журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»

С тематическими указателями статей за 1996 - 2006 гг., аннотациями и с содержанием последних номеров можно ознакомиться на нашем сайте:

<http://www.miet.ru/static/je/os.html>

МОП-структуры с аморфным триоксидом вольфрама для емкостных сенсоров влажности

Е.А.Тутов

Воронежский государственный университет

Исследованы электрофизические характеристики структуры $Al/a-WO_3/n-Si$ в условиях сорбции паров воды. Определены параметры этой структуры как емкостного сенсора влажности.

Оксиды переходных металлов обладают высокими адсорбционными и каталитическими свойствами. Аморфные пленки триоксида вольфрама $a-WO_3$ имеют пористую структуру с большой удельной поверхностью [1], что делает этот материал активным адсорбентом.

Снижение избытка свободной энергии вакуумно-конденсированных пленок $a-WO_3$ может происходить путем структурной реконструкции или за счет сорбции, например, паров воды [2]. Если созданы условия для доминирования второго процесса, то абсорбция паров воды приводит к образованию гидратов $a-WO_3 \cdot 1,5 H_2O$. Если первоначально происходит структурная релаксация, то последующее взаимодействие с парами воды имеет характер физической адсорбции и является обратимым безактивационным процессом. Для таких пленок возможно исследование влияния адсорбции паров воды на их электрофизические характеристики с функциональными приложениями в области сенсоров влажности [3]. Исследователи отмечают двойственную роль воды в функциональных свойствах аморфных пленок триоксида вольфрама [4].

Ранее были исследованы емкостные сенсоры влажности со слоями пористого кремния [5] и полиамида [6] в качестве адсорбента, для которых диэлектрическая проницаемость ϵ существенно меньше диэлектрической проницаемости воды ($\epsilon = 81$). В случае с пленками $a-WO_3$, значение ϵ которых составляет 50–100 [7], ситуация принципиально отлична и представляет самостоятельный интерес как в фундаментальном, так и прикладном аспектах.

Методика эксперимента. Аморфные пленки триоксида вольфрама $a-WO_3$ получены термическим испарением [8]. Конденсация пленок осуществлялась в камере прибора ВУП-4 в вакууме до 10^{-4} Па. Температура поверхности подложек T_n поддерживалась в процессе конденсации в интервале 350–360 К. Сформированные при такой температуре пленки являлись рентгено- и электроноаморфными. Температура вольфрамовых испарителей $T_{исп}$ контролировалась хромель-алюмелевой термопарой или с помощью оптического пирометра. Нагрев осуществлялся до рабочей температуры $T_{исп} = 1420$ К, обеспечивающей испарение исходного порошка WO_3 .

Толщина пленок варьировалась в диапазоне 0,5–2 мкм. В качестве подложки использовался монокристаллический кремний марки КЭФ-4,5. Металлические электроды (Al) имели площадь 1 и 2 мм² и толщину 1 мкм. Сорбционные свойства изучали для пленок, прошедших естественное старение в течение года при нормальных условиях. Такие пленки $a-WO_3$ построены из аксиально-деформированных вольфрам-кислородных октаэдров, соединенных вершинами и образующими планарную сетку [2]. Для этих пленок изменение относительной влажности окружающего воздуха p/p_s сопровождается сорбционно-десорбционными процессами, имеющими в основном физический механизм.

Физическая адсорбция паров воды в α - WO_3 приводит к изменению электрофизических свойств пленок оксида, в частности эффективной диэлектрической проницаемости, которая оценивалась по результатам измерений электрической емкости структуры $\text{Al}/\alpha\text{-WO}_3/\text{Si}$. Частотную зависимость емкости изучали с помощью LCR-метра Goodwill (модель 819) в диапазоне частот от 12 Гц до 100 кГц. Высокочастотные вольт-фарадные характеристики (ВЧ ВФХ) измеряли на частоте 1 МГц [5, 6]. Исследуемый образец помещали в герметичную измерительную ячейку, для удаления паров воды из которой использовали осушитель с гранулированным мелкопористым силикагелем марки ШСМ. Остаточное давление паров воды считали соответствующим условному значению нулевой относительной влажности. Насыщение воздуха водяными парами (относительная влажность 100%) устанавливалось в ячейке при равновесии с открытой поверхностью дистиллированной воды. Промежуточные значения относительной влажности воздуха задавали с помощью насыщенных растворов солей. Все измерения проводились при температуре 295 К.

Результаты и их обсуждение. Зависимость электрической емкости структуры $\text{Al}/\alpha\text{-WO}_3/\text{Si}$ от частоты измерительного сигнала при относительной влажности 0 и 100% приведена на рис.1. ВЧ ВФХ структуры при этих и промежуточных значениях относительной влажности показаны на рис.2. На рис.3 представлена зависимость емкости в области обогащения (при напряжении +2 В) от относительной влажности воздуха для структур с различной площадью затворного электрода. Кинетика сорбции-десорбции паров воды для сенсора при нулевом напряжении смещения отражена на рис.4.

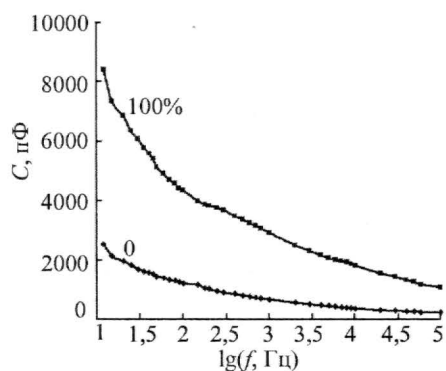


Рис.1. Частотная зависимость емкости структуры $\text{Al}/\alpha\text{-WO}_3/n\text{-Si}$ при различной относительной влажности воздуха. Напряжение смещения равно нулю

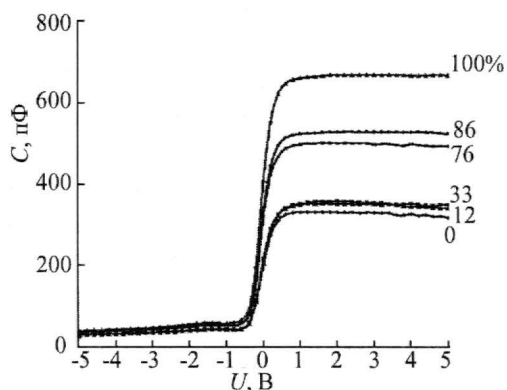


Рис.2. ВЧ ВФХ структуры $\text{Al}/\alpha\text{-WO}_3/n\text{-Si}$ в зависимости от относительной влажности. Толщина диэлектрика 1,5 мкм

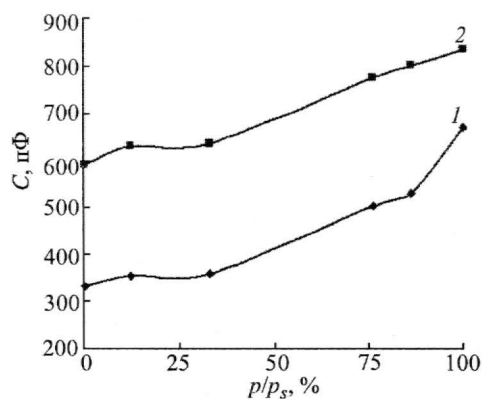


Рис.3. Зависимость электрической емкости структуры при напряжении смещения +2 В от относительной влажности: 1 – площадь алюминиевого электрода 1 мм²; 2 – 2 мм²

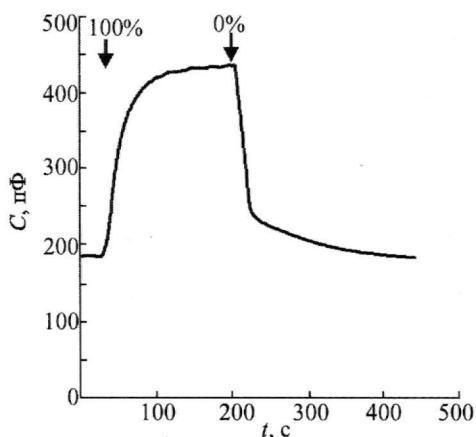


Рис.4. Кинетика сорбции-десорбции паров воды пленкой $\alpha\text{-WO}_3$

В исследованном диапазоне частот зависимость емкости структуры (см. рис.1) и, следовательно, диэлектрической проницаемости $a\text{-WO}_3$ от частоты переменного сигнала является монотонной и бесструктурной, хотя и более слабой, чем в работе [1]. Изменение p/p_s от 0 до 100% приводит к росту эффективной диэлектрической проницаемости $a\text{-WO}_3$ в среднем в четыре раза, что связано с аддитивным вкладом сорбированной в пленке воды и вкладом структурной природы. Для минимизации последнего в качестве рабочей частоты выбрали 1 МГц. Как было установлено в [6], на высокой частоте возможно улучшение кинетики отклика сенсора влажности. ВЧ ВФХ имеют вид, типичный для МОП-структуры с пленками $a\text{-WO}_3$ стехиометрического состава [9].

Диэлектрическая проницаемость «сухих» пленок $a\text{-WO}_3$ ($\epsilon \approx 50$) соответствует ранее определенным значениям. Увеличение относительной влажности сопровождается ростом емкости при положительном смещении (в области обогащения). Главным образом это связано с сорбцией паров воды в объеме слоя оксида и возрастанием его диэлектрической проницаемости. Другая причина, по-видимому, связана с ростом проводимости гидратированной пленки $a\text{-WO}_3$ и возможным увеличением эффективной площади электрода. Последнее осложняет количественную интерпретацию измерений электрической емкости для неидеальных диэлектриков с высокой проводимостью. Величина эффекта растекания заряда по проводящему слою диэлектрика должна зависеть от геометрии затворного электрода, а именно от соотношения площади и периметра. Вклад краевых эффектов будет заметнее в случае электрода меньшего размера.

Приведенные на рис.3 графики зависимости емкости при обогащающем смещении от относительной влажности для двух структур с различной площадью электродов подтверждают это заключение: для структуры с меньшим электродом емкость при сорбции паров воды изменяется более значительно. Принимая для оценки, что поры в $a\text{-WO}_3$ занимают до 30% объема [1], можно ожидать при их заполнении водой увеличение емкости структуры в 1,8 раза. В эксперименте высокочастотная емкость указанных структур возросла примерно в полтора и два раза. Отметим, что для структур с поликристаллическими слоями WO_3 , сформированных оксидированием пленок вольфрама на кремнии, влияние относительной влажности на емкость и проводимость пренебрежимо мало для частот свыше 100 Гц. Начальный участок кривых (см. рис.3 для p/p_s до 35%) аналогичен виду лэнгмюровской изотермы адсорбции [10], соответствующей моно- и полимолекулярному наслаиванию. При $p/p_s > 35\%$, когда для паров воды возможным механизмом адсорбции становится капиллярная конденсация, наблюдается соответствующее более быстрое возрастание емкости. Данные графики можно считать градуировочными кривыми для емкостных сенсоров влажности.

Кинетика отклика сенсора на изменение относительной влажности воздуха от 0 до 100%, показанная на рис.4, имеет двухстадийный характер. Быстрая реакция связана с сорбцией-десорбцией паров воды на доступной поверхности $a\text{-WO}_3$, а медленная определяется диффузионным переносом молекул воды в объеме оксида под затворным электродом. В целом, время установления стационарных значений емкости составляет менее 5 мин.

В заключение можно сделать следующие выводы: структурно-стабилизированные аморфные пленки триоксида вольфрама обратимо сорбируют пары воды с заметным изменением диэлектрической проницаемости; адсорбция паров воды не изменяет зарядовых параметров структуры $\text{Al}/a\text{-WO}_3/\text{Si}$, ее ВЧ ВФХ показывают систематический рост емкости в обогащении с увеличением относительной влажности; зависимость этой емкости от относительной влажности отражает вид изотермы адсорбции паров воды для аморфного триоксида вольфрама; емкостный сенсор влажности на основе структуры $\text{Al}/a\text{-WO}_3/\text{Si}$ характеризуется чувствительностью в широком диапазоне p/p_s .

Литература

1. *Гаврилюк А.И., Секушин Н.А.* Электрохромизм и фотохромизм в оксидах вольфрама и молибдена. – Л.: Наука, 1990. – 104 с.
2. *Кукуев В.И., Тутов Е.А., Лесовой М.В., Домашевская Э.П.* Изменения ближнего атомного порядка в пленках α - WO_3 в процессе окрашивания, адсорбции воды и в результате старения // Кристаллография. – 1988. – Т. 33, вып. 6. – С. 1551, 1552.
3. *Подлепецкий Б.И., Симаков А.В.* Микроэлектронные датчики влажности // Зарубежная электронная техника. – 1987. – Вып. 2. – С. 64–97.
4. *Granqvist C.G.* Handbook of Inorganic Electrochromic Materials. – Elsevier, Amsterdam, 1995. – 650 p.
5. Влияние адсорбции паров воды на вольт-фарадные характеристики гетероструктур с пористым кремнием / *Е.А. Тутов, Е.Н. Бормонтов, В.М. Каишаров и др.* // ЖТФ. – 2003. – Т. 73, вып. 11. – С. 83–89.
6. МДП структура с полиамидным диэлектриком в условиях сорбции паров воды / *Е.А. Тутов, Е.Н. Бормонтов, М.Н. Павленко и др.* // ЖТФ. – 2005. – Т. 75. – Вып. 8. – С. 85–89.
7. Поверхностные состояния и заряд в МДП-структуре с пленкой триоксида вольфрама / *В.И. Кукуев, Е.А. Тутов, М.В. Лесовой и др.* // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1988. – № 11. – С. 87–92.
8. *Кукуев В.И.* Характер взаимодействий и физико-химические свойства оксидных пленок сложного состава: Дис. докт. физ.-мат. наук. – М., 1996. – 339 с.
9. Электронные процессы в гетероструктуре α - WO_3/Si при электро- и фотохромизме / *Е.А. Тутов, В.И. Кукуев, А.А. Баев и др.* // ЖТФ. – 1995. – Т. 65, вып. 7. – С. 117–124.
10. *Грег С., Синг К.* Адсорбция, удельная поверхность, пористость. – М.: Мир, 1984. – 304 с.

Статья поступила
18 января 2007 г.

Тутов Евгений Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела физического факультета Воронежского государственного университета. *Область научных интересов:* электрофизика гетерогенных систем, полупроводниковые сенсоры.

Книжные новинки



**Герасименко Н.Н., Пархоменко Ю.Н. Кремний – материал наноэлектроники. – М.: Техносфера, 2007. – 352 с., 3 с. цв. вклейки.
ISBN 10: 5-94836-101-2
ISBN 13: 978-5-94836-101-7**



Монография посвящена рассмотрению проблем и возможностей использования кремния для создания приборов и устройств наноэлектроники и нанофотоники. Даны представления о квантоворазмерных эффектах, возможности их проявления в кремниевых элементах и структурах, а также физических ограничениях.

Рассмотрены наиболее перспективные технологические возможности формирования наноразмерных кремниевых структур.

МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 681.3; 621.3

Применение микроконтроллеров для синтеза цифровых конечных автоматов

Ю.М.Агафонов, Н.С.Акиншин, Р.Н.Акиншин, К.А.Анкудинов, А.И.Анкудинов, К.Ю.Казаков

Тульский артиллерийский инженерный институт

Проведен статистический анализ и вероятностная оценка работоспособности ячеек памяти данных EEPROM микроконтроллеров серии PIC16F877A, составлена таблица вероятностей отказов ячеек памяти в функции от количества циклов «стирание–запись». Таблица вероятностей позволяет оценивать надежность синтезируемых цифровых конечных автоматов.

Цифровые конечные автоматы (ЦКА) являются функционально законченными электронными устройствами, обеспечивающими прием входных сигналов, их обработку по заданному алгоритму и управление внешними устройствами по результатам выполнения алгоритма. С точки зрения реализации возможности синтеза ЦКА на основе современных микроконтроллеров (МК) определяющими являются технические характеристики МК и в первую очередь наличие электрически стираемой энергонезависимой памяти данных EEPROM.

В настоящее время десятки зарубежных и отечественных фирм выпускают сотни типов МК с памятью данных EEPROM. Лидерами в разработке и производстве МК среднего поколения являются компании Microchip и Atmel, характеристики их продукции приведены в [1–3]. Эти МК обеспечивают производительность до 1–5 MIPS и содержат: FLASH-память программ до 4–8 Кбайт; EEPROM память данных до 256–512 байт; SRAM память данных до 256–512 байт; до четырех 8-битных портов ввода–вывода; модули последовательного (USART) и параллельного (PSP) интерфейсов; модули ШИМ, АЦП, компараторов и счетчиков-таймеров. Такие функциональные возможности МК позволяют строить на них широкий класс ЦКА.

Надежность работы электрически стираемой энергонезависимой памяти данных EEPROM МК определяется количеством ячеек памяти, включенных в выполнение алгоритма работы ЦКА, и допустимым числом циклов «стирание–запись» каждой ячейки при сохранении ее работоспособности. В технической документации на МК [1–3] приведены типовые значения допустимого количества циклов «стирание–запись»: для МК фирмы Atmel [1] до 10^6 циклов; для МК фирмы Microchip [2, 3] до 10^7 циклов. Эти параметры определены теоретически, но не протестированы, а они являются определяющими. Целесообразно рассмотреть МК фирмы Microchip и провести статистический анализ и вероятностную оценку работоспособности памяти данных EEPROM МК.

В качестве экспериментальной базы взяты два МК среднего поколения типа PIC16F877A [3], каждый из которых содержит по 256 однобайтных ячеек памяти EEPROM. Таким образом, в статистическом эксперименте, независимо друг от друга, было задействовано $N = 256 \cdot 2 = 512$ ячеек памяти EEPROM. В ходе эксперимента программно производились циклы «стирание–запись» всех 512 ячеек памяти EEPROM (алгоритм, программу и hex-файл статистического эксперимента можно получить по адресу E-mail: aai_tula@mail.ru). Результаты эксперимента сведены в группированный статистический ряд (табл.1).

Таблица 1

Статистическое распределение плотности вероятностей отказов ячеек памяти в функции от количества циклов «стирание–запись»

Интервалы циклов «стирание–запись» y_i	Количество отказавших ячеек n_i в интервале y_i	Статистическое распределение плотности вероятности отказов ячеек q_i^*	Единичные интервалы циклов «стирание–запись» x_i	Гипотетическое распределение плотности вероятности отказов ячеек q_i
1	2	3	4	5
$y_1 \in (4; 5) \cdot 10^6$	4	0,008	$x_1 \in (-5; -4)$	0,006
$y_2 \in (5; 6) \cdot 10^6$	12	0,024	$x_2 \in (-4; -3)$	0,027
$y_3 \in (6; 7) \cdot 10^6$	42	0,082	$x_3 \in (-3; -2)$	0,085
$y_4 \in (7; 8) \cdot 10^6$	91	0,177	$x_4 \in (-2; -1)$	0,176
$y_5 \in (8; 9) \cdot 10^6$	123	0,240	$x_5 \in (-1; 0)$	0,246
$y_6 \in (9; 10) \cdot 10^6$	131	0,256	$x_6 \in (0; 1)$	0,231
$y_7 \in (10; 11) \cdot 10^6$	71	0,138	$x_7 \in (1; 2)$	0,145
$y_8 \in (11; 12) \cdot 10^6$	27	0,053	$x_8 \in (2; 3)$	0,062
$y_9 \in (12; 13) \cdot 10^6$	8	0,016	$x_9 \in (3; 4)$	0,017
$y_{10} \in (13; 14) \cdot 10^6$	3	0,006	$x_{10} \in (4; 5)$	0,003

В столбце 1 (см. табл.1) статистический ряд циклов «стирание–запись» ячеек памяти EEPROM сгруппирован в интервалы y , где $y_i \in (1; 10)$. Каждому интервалу y соответствует $1 \cdot 10^6$ циклов «стирание–запись». В столбце 2 приведено количество ячеек памяти n_i , отказавших на i -м интервале эксперимента. В столбце 3 представлены результаты расчета статистического распределения плотности вероятности отказов ячеек памяти $q_i^* = n_i / N$ в каждом i -м интервале эксперимента. По результатам, размещенным в столбцах 1 и 3, построена гистограмма статистического распределения плотности вероятности отказов ячеек памяти EEPROM $f^*(x)$ на каждом i -м интервале эксперимента, которая представлена на рис.1.

Для облегчения процесса обработки результатов эксперимента на рис.1 кроме абсциссы текущего значения количества циклов «стирание–запись» y , искусственно введена вторая ось абсцисс x , где каждому интервалу y_i соответствует единичный интервал x_i . Единичные интервалы x_i сведены в столбец 4 (см. табл.1), где приведены их значения от -5 до $+5$.

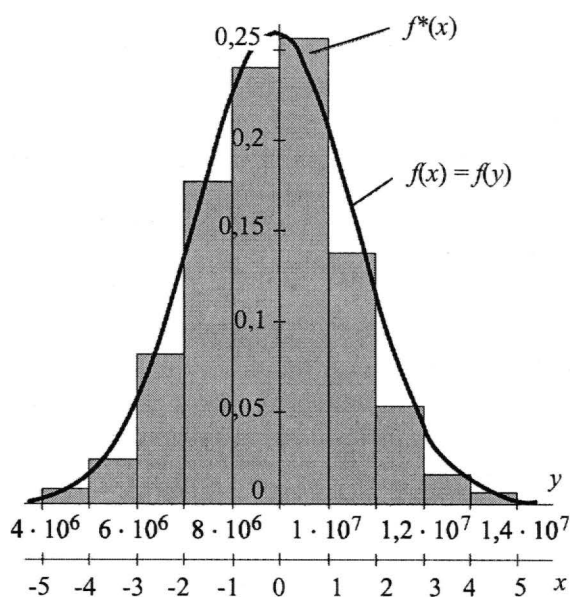


Рис.1. Гистограмма и закон распределения отказов ячеек памяти EEPROM

Выровняем статистическое распределение плотности вероятности отказов $f^*(x)$ (см. рис.1) с помощью гипотетического нормального закона распределения [4]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - m_x)^2}{2\sigma_x^2}\right). \quad (1)$$

В выражении (1) необходимо подобрать математическое ожидание m_x и средне-квадратическое отклонение σ_x таким образом, чтобы сохранить неизменными первые два момента статистического распределения плотности вероятности отказов $f^*(x)$ [4].

Приближенное численное значение статистического среднего значения находим из соотношения

$$m_x^* = \sum_{i=1}^{10} (\tilde{x}_i \cdot q_i^*) \approx -0,160, \quad (2)$$

где \tilde{x}_i – среднее значение интервала x_i ($\tilde{x}_1 = -4,5$; $\tilde{x}_2 = -3,5$; ...; $\tilde{x}_{10} = 4,5$).

Приближенное численное значение статистического второго начального момента определяем из выражения

$$a_2^* = \sum_{i=1}^{10} (\tilde{x}_i^2 q_i^*) \approx 2,449.$$

Статистическая дисперсия определяется разностью статистического второго начального момента a_2^* и квадрата статистического среднего значения m_x^* [4], откуда находим численное значение статистического среднеквадратического отклонения:

$$\sigma_x^* = \sqrt{D_x^*} = \sqrt{a_2^* - (m_x^*)^2} \approx 1,558. \quad (3)$$

Из выражения (1), полагая $m_x = m_x^*$ и $\sigma_x = \sigma_x^*$, определенным в (2) и (3), находим закон гипотетического нормального распределения по искусственно введенной координате x

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - m_x)^2}{2\sigma_x^2}\right) = 0,256 \cdot \exp\left(-\frac{(x + 0,160)^2}{4,855}\right). \quad (4)$$

Подставляя в (4) граничные значения интервалов (см. табл.1, столбец 4), получаем значения функции на границах интервалов и при $x = m_x = -0,160$

$$\begin{aligned} f(-5) &= 0,002; & f(-4) &= 0,012; & f(-3) &= 0,049; \\ f(-2) &= 0,127; & f(-1) &= 0,221; & f(0) &= 0,255; \\ f(1) &= 0,194; & f(2) &= 0,098; & f(3) &= 0,033; \\ f(4) &= 0,007; & f(5) &= 0,001; & f(-0,160) &= 0,256. \end{aligned} \quad (5)$$

По значениям (5) построена выравнивающая гистограмму гипотетическая функция нормального распределения отказов ячеек памяти EEPROM (см. рис.1, жирная кривая).

Плотность распределения отказов ячеек памяти при нормальном распределении (4) в каждом i -м интервале определяется выражением

$$q_i = \int_{a_i}^{b_i} f(x) dx = \int_{a_i}^{b_i} 0,256 \cdot \exp\left(-\frac{(x + 0,160)^2}{4,855}\right) dx, \quad (6)$$

где a_i и b_i – нижняя и верхняя границы i -го интервала соответственно.

Плотности вероятностей отказов q_i , рассчитанные для каждого i -го интервала по выражению (6), сведены в столбец 5 (см. табл.1).

Проверим, не противоречат ли статистические данные $f^*(x)$, представленные в виде гистограммы на рис.1, и гипотетический закон распределения (4). Для этого воспользуемся критерием согласия χ^2 Пирсона [5]

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{10} \left(\frac{(n_i - Nq_i)^2}{Nq_i} \right) \approx 4,321. \quad (7)$$

При наложении требований совпадения статистического среднего (2) и статистической дисперсии (3) с их гипотетическими значениями по значению χ^2 (7) из таблицы приложения [5] определяем вероятность правдоподобия гипотезы о совпадении статистических данных $f^*(x)$ и гипотетического закона нормального распределения $f(x)$; она имеет значение $p_\chi = 0,74$ или 74%. Это свидетельствует о том, что выдвинутая гипотеза о нормальном распределении статистических данных справедлива.

Анализ табл.1 и рис.1 приводит к выводу, что при $m_x = -0,160$, получаем математическое ожидание наработки на отказ ячейки памяти EEPROM $m_y = 8,84 \cdot 10^6$ циклов «стирание–запись», а при $\sigma_x = 1,558$ получаем среднеквадратическое отклонение $\sigma_y = 1,558 \cdot 10^6$ циклов «стирание–запись». Следовательно, закон распределения отказов ячеек памяти принимает вид

$$f(y) = 0,256 \cdot \exp \left(- \frac{(y - 8,84 \cdot 10^6)^2}{4,855 \cdot 10^{12}} \right). \quad (8)$$

Учитывая (8), зависимость вероятности безотказной работы каждой ячейки памяти EEPROM в функции от количества циклов «стирание–запись» принимает вид

$$p(y) = 1 - 0,256 \cdot \int_0^{\infty} \exp \left(- \frac{(y - 8,84 \cdot 10^6)^2}{4,855 \cdot 10^{12}} \right) dy. \quad (9)$$

По выражению (9) рассчитаны вероятности безотказной работы ячеек памяти (табл.2).

Методики расчета надежности технических систем [6, 7] позволяют по алгоритму работы ЦКА и вероятности безотказной работы ячеек памяти EEPROM МК (см. табл.2) рассчитывать надежность проектируемых ЦКА. Структура памяти EEPROM МК позволяет достаточно просто осуществлять программное «горячее» резервирование фрагментов алгоритма работы ЦКА с низкой надежностью. Например, на рис.2 показан фрагмент алгоритма работы ЦКА, где ячейки памяти 2 и 3 имеют вероятность безотказной работы p (см. табл.2).

Таблица 2
Вероятность безотказной работы ячеек памяти

Циклы «стирание–запись»	Вероятность безотказной работы ячейки p
$1 \cdot 10^6$	1,000000
$1,5 \cdot 10^6$	0,999999
$2 \cdot 10^6$	0,999994
$2,5 \cdot 10^6$	0,999976
$3 \cdot 10^6$	0,999911
$3,5 \cdot 10^6$	0,999695
$4 \cdot 10^6$	0,999053
$4,5 \cdot 10^6$	0,997329
$5 \cdot 10^6$	0,993144
$5,5 \cdot 10^6$	0,983975
$6 \cdot 10^6$	0,965840
$6,5 \cdot 10^6$	0,933450
$7 \cdot 10^6$	0,881217
$7,5 \cdot 10^6$	0,805161
$8 \cdot 10^6$	0,705165
$8,5 \cdot 10^6$	0,586458
$9 \cdot 10^6$	0,459216
$9,5 \cdot 10^6$	0,336064
$10 \cdot 10^6$	0,228441

Необходимо произвести «горячее» резервирование этих ячеек с целью получения требуемой вероятности безотказной работы $P_{тр}$. Для фрагмента алгоритма работы ЦКА (см. рис.2) кратность резервирования K определяется из соотношения

$$K \geq \frac{\ln(1 - P_{тр}) - \ln(1 - p)}{\ln(1 - p^2)} - 1,$$

где p выбирается из табл.2 и определяется допустимым количеством циклов «стирание-запись» ячеек памяти EEPROM МК синтезируемого ЦКА.

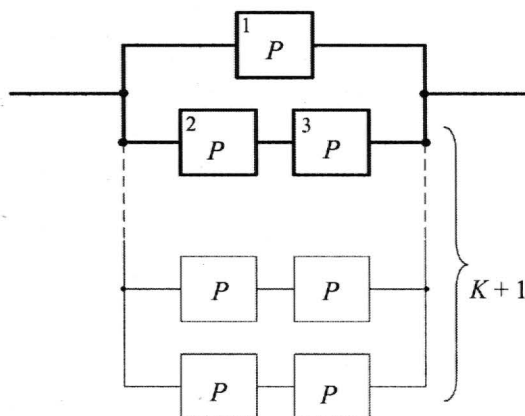


Рис.2. Фрагмент алгоритма «горячего» резервирования ячеек памяти EEPROM

Литература

1. *Евстифеев А.В.* Микроконтроллеры AVR семейства Classic фирмы «ATMEL». – М.: Издательский дом «Додэка - XXI», 2002. – 288 с.
2. Справочник по семейству микроконтроллеров PICmicro. – М.: ООО «Микро-Чип», 2002. – 601 с.
3. 28/40/44 - Pin Enhanced Flash Microcontrollers PIC16F87XA. – USA.: Microchip Technology Incorporated, 2003. – 243 с.
4. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – М.: Высшая школа, 2000. – 383 с.
5. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Высшая школа, 2000. – 480 с.
6. Сборник задач по теории вероятностей, математической статистике и теории случайных функций / *Б.Г.Володин и др.* – М.: Наука, 1970. – 656 с.
7. Методика построения микроразнообразных устройств управления СКЗ МГ / *Ю.М.Агафонов, А.И. Анкудинов и др.* // Газовая промышленность. – 2007. – № 4. – С. 48–51.

Статья поступила
24 апреля 2007 г.

Агафонов Юрий Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем радиопередачи Тульского артиллерийского инженерного института (ТАИИ). *Область научных интересов:* микроэлектронные приборы и системы.

Акиншин Николай Степанович – доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник НИЛ ТАИИ. *Область научных интересов:* статистическая радиотехника и синтез цифровых конечных автоматов.

Акиншин Руслан Николаевич – кандидат технических наук, преподаватель кафедры радиоэлектронных устройств и систем радиопередачи ТАИИ. *Область научных интересов:* защита информации, микропроцессорная техника, радиоэлектроника.

Анкудинов Константин Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры радиолокационного вооружения ТАИИ. *Область научных интересов:* статистическая радиолокация, микропроцессорная техника.

Анкудинов Александр Иванович – кандидат технических наук, начальник бюро НТИ ТАИИ. *Область научных интересов:* микропроцессорная схемотехника, теле- и радиопередача.

Казаков Константин Юрьевич – младший научный сотрудник НИЛ ТАИИ. *Область научных интересов:* радиоэлектронные средства и системы.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.4'227:621.396.218

Оценка качества речепреобразования в низкоскоростных вокодерах на этапах проектирования

А.С.Лихачев, С.А.Лупин

**Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)**

Представлен метод анализа эффективности речепреобразования, учитывающий специфику обработки речевых сигналов низкоскоростными вокодерами. В основе метода лежит использование аналитической и программной модели оценки качества преобразования речевой информации путем сравнительного анализа искажений спектральных характеристик сигнала.

Несмотря на значительный прогресс в области систем передачи данных, связанный с постоянным ростом частотных характеристик каналов связи, не ослабевает практический интерес и к низкоскоростным каналам. Для передачи речи в них используются вокодеры. Процесс их проектирования включает обязательные финальные испытания устройства, требующие проведения время- и трудозатратных процедур. В настоящей работе предлагается метод сравнительной качественной оценки систем речепреобразования, позволяющий значительно сократить время их проектирования.

Важнейшим показателем качества систем связи является параметр, называемый разборчивостью передаваемой речи. Для поддержания качества обслуживания абонентов в системах связи необходимо, чтобы этот параметр сохранял свое значение как в обстановке зашумленности, так и при ухудшении качества канала связи.

На сегодняшний день оценка качества обработки речи является сложным и трудоемким процессом. В нашей стране были разработаны и стандартизированы методики оценки параметров качества речи, разборчивости и узнаваемости при передаче по трактам радиотелефонной связи, а также низкоскоростной передачи речи по цифровым каналам (ГОСТ 16600-72, ГОСТ Р 50840-95 и ГОСТ Р 51061-97) [1–3]. Для оценки качества стандарты предлагают методики артикуляционных испытаний, целью которых является определение класса по разборчивости, в который попадает испытуемый образец кодера. К сожалению, такие испытания связаны с большими времяматериальными затратами, требуют специальной подготовки квалифицированной группы операторов (аудиторов и слушателей), на организацию и подготовку которой налагаются жесткие требования. Также нельзя не учитывать необходимость в специальных приборах, оборудовании и квалифицированном персонале, способном на нем работать. В случае коммерческого и мелкосерийного производства, на стадии разработки или при наладке подобные затраты нецелесообразны.

Достаточно часто приходится для конкретной системы подбирать оптимальные настройки отдельных узлов, например набор коэффициентов цифровых фильтров. Эти наборы могут изменяться в зависимости от аналоговой части вокодерной системы, и их оптимизация положительно влияет на качество речепреобразования. Пусть в некоторой системе используется 5 фильтров и рассматриваются 10 возможных наборов коэффициентов для каждого из них. В простом варианте нужно провести $5 \cdot 10 = 50$ испытаний (нахождение лучшего фильтра из 10 при фиксированных остальных), в общем же случае – 10^5 (полный перебор). К тому же при сравнении близких наборов коэффициентов изменения наиболее вероятно будут незначительными и не различимыми на слух. Следовательно, образцы с разными параметрами будут определены как «идентичные» при субъективном методе оценки.

Описанные в ГОСТе методики применяют компьютеры только для хранения данных, внесения и автоматизации подсчета результатов [1–3], однако не используют возможности современной вычислительной техники в области цифровой обработки и анализа как звуковой, в общем, так и речевой, в частности, информации.

Аналитическое исследование качества речепреобразования. Анализ акустических характеристик речевого сигнала начинается с записи изменения звукового давления во времени с помощью микрофона. Зависимость мгновенного значения звукового давления от времени представляется в виде осциллограммы (уровнеграммы) – зависимости уровня звукового давления от времени (рис.1).

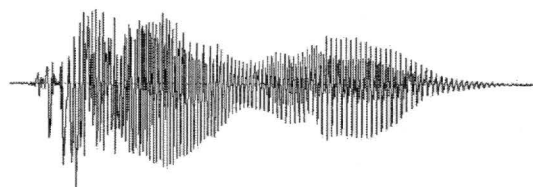


Рис.1. Уровнеграмма слова «алло»

Непосредственно из анализа уровнеграмм речевого сигнала, прежде всего, может быть получена информация о распределении мгновенных значений и уровней звукового сигнала во времени и длительности их превышения установленного значения. Это позволяет определить динамический диапазон и пик-фактор речевого сигнала, а также установить распределение длительности пауз, отрезков непрерывных речевых

звучаний, распределения текущей и средней мощности сигнала во времени и др.

В качестве модели объекта исследования используем аналитическое описание звукового сигнала в виде суммы узкополосных сигналов. Результаты исследований последних лет показали, что данные, необходимые для расчета параметров, содержатся в динамических спектральных развертках – амплитудно-фазовых и частотно-временных описаниях речевых сигналов с заданным шагом наблюдения (анализа) по времени и по частоте и прежде всего в изображениях узкополосных амплитудных сонограмм [4]. Такие развертки, часто называемые матрицами динамических спектральных состояний (МДСС), можно получать в ходе динамического спектрального анализа-синтеза речи (ДСАС), скользя по исходному сигналу выбранным окном анализа с переходом от взвешенных им выборов к их частотному образу на базе принятого ортогонального базиса. Примером такого рода технологий может служить кратковременный фурье-анализ-синтез звуковых сигналов, часто используемый в цифровых системах речепреобразования. Для дискретизированного сигнала оконное преобразование Фурье имеет вид

$$\tilde{X}[k] = \sum_{n=0}^{N-1} p[n] \tilde{x}[n] W_N^{kn} \Big|_{W_N^{kn} = e^{-j(2\pi/N)n}}, \quad (1)$$

где $\tilde{X}[k]$ – дискретный фурье-образ последовательности $x[n]$ ограниченного окном преобразования, $p[n]$ – весовые коэффициенты сглаживающего окна.

Спектральные характеристики акустических параметров речевого сигнала и динамика их изменения в виде амплитуд и фаз узкополосных сигналов проявляются на изображениях динамических спектрограмм в виде совокупности контуров (линий) перепада цвета (для многоцветных спектрограмм) или яркости и треков (цепочек) локальных и глобальных экстремумов цветовой насыщенности в уровнях одного цвета.

На протяжении почти ста лет превалировало мнение Гельмгольца о том, что наша слуховая система не чувствительна к изменениям фазовых соотношений между отдельными частотными компонентами (обертонными) [5]. Однако постепенно были накоплены экспериментальные данные о том, что слуховой аппарат все-таки чувствителен к изменениям фаз между различными компонентами сигнала. В частности, было установлено, что слуховой порог к фазовому сдвигу в двух- и трехкомпонентных сигналах в области низких и средних частот составляет 10–15 градусов. При монофонической звуковой картине небольшие фазовые искажения незаметны на слух, и если максимальное время групповой задержки меньше индивидуального порога восприятия, фазовые искажения слушателями не ощущаются. Это подтверждает, что моноуральное восприятие фазы связано со способностью слуха детектировать огибающую и мгновенную частоту сигнала и нечувствительностью к изменениям фазы несущего колебания [6]. Более значительные искажения, изменяющие фазовые соотношения между имеющимися спектральными компонентами сигнала, воспринимаются как искажения тембра или «окрашивание» звука. Однако это влияет в большей степени на характеристику узнаваемости, а не разборчивости. Для низкоскоростных вокодеров с целью получения максимального эффекта сжатия передаваемого потока информации требования по узнаваемости значительно снижаются либо вообще не предъявляются. Таким образом, оценка рассматриваемой модели будет проводиться только в аспекте анализа спектрального энергетического распределения.

Выбор числа временных отсчетов (размерности ДПФ) и длительности отрезка анализируемого сигнала определяет точность разрешения по частоте (т.е. расстояние между частотными отсчетами). При фиксированной размерности ДПФ невозможно обеспечить одновременно «хорошее» развертывание и по частоте и по времени, поскольку они связаны определенным соотношением $\Delta f \cdot \Delta t = N$. Чем выше разрешение по частоте, тем хуже разрешение по времени, и наоборот. Для параметрических вокодеров, характерными временными интервалами анализа, с предполагаемыми квазистационарными характеристиками, являются фреймы длительностью 30–150 мс. Учитывая, что частота дискретизации входного речевого сигнала в низкоскоростных вокодерах применяется порядка 7200–8000 Гц, оптимальным является выбор размера ДПФ 512 или 1024 точек (отсчетов), что также подтверждается и экспериментальными результатами. Выбор накладываемого сглаживающего окна зависит от реализации программы спектрального анализа, при этом эмпирическая проверка показывает, что лучшие результаты для речи дает применение окон Блэкмана, Блэкмана–Харриса и Ханна, и менее хорошие – Хэмминга и треугольного.

Кроме двумерных спектров (частота – амплитуда) алгоритмы ЦОС позволяют построить для любого речевого сигнала его трехмерные (кумулятивные) спектры, где по одной оси отложено время, по другой – частота, по третьей – амплитуда или производная от нее характеристика (энергия, мощность или их нормированные плотности) (рис.2). Такие спектры позволяют получить значительно больше информации не только о спектральном составе сигнала, но и характере изменения его во времени. Трехмерные спектры широко используются в практике изучения различных акустических сигналов, однако для анализа речевых сигналов наибольшее распространение имеют трехмерные спектры особой формы – спектрограммы.

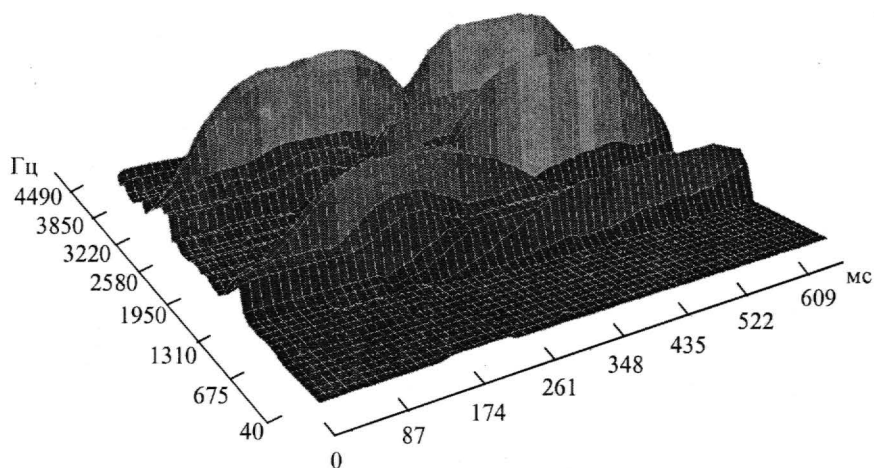


Рис.2. Трехмерный (кумулятивный) спектр речевого сигнала

В низкочастотной области слух оценивает значение основной частоты фонации и ее первых обертонов и по ним определяет высоту голоса. В верхней области частот слух точно оценивает изменение огибающей во времени, что позволяет ему выделить формантную картину, которая служит базовой информацией для верхних отделов мозга при определении фонетического значения отдельных фонем, слогов и др. [5].

Заметим, что в частотной области легко проводить избирательный анализ, выбирая интересующую полосу частот, а также вводить поправки наложением масок весовых коэффициентов, например, модели реальной акустической обстановки или слуховой восприимчивости субъекта.

Таким образом, при анализе акустических параметров речевого сигнала оцениваются следующие характеристики:

- уровнеграмма и все связанные с ней параметры (динамический диапазон, распределение мгновенных значений сигнала, текущая мощность и др.);
- графически-двумерный спектр (распределение формантных областей);
- графически-трехмерный спектр (изменение формы огибающей во времени);
- распределение спектральной плотности мощности.

Спектральная плотность мощности (СПМ) (Power Spectral Density – PSD) является действительной, четной и неотрицательной функцией частоты и дает распределение мощности сигнала по диапазону частот. Для дискретизированного сигнала СПМ с точностью до нормировочного коэффициента определяется из соотношения

$$\text{psd}[n] = |c_n|^2, \quad (2)$$

где c_n – комплексные коэффициенты ряда Фурье.

СПМ измеряется в единицах мВ²/Гц, а ее оценка – в мВ² (т.е. это мощность, отнесенная к узкой полосе частотного спектра, равной интервалу между соседними частотными отсчетами). При нормализации СПМ к единичной мощности можно также получить оценку в логарифмической шкале. Пронормированную к частоте и нормализованную к единичной величине спектрограмму будем называть сонограммой.

Графический анализ. Приведем пример сонограмм для слова «алло» до преобразования анализ-синтез вокодером CELP – 2400 (рис.3), после преобразования (рис.4) и графическую разность (рис.5).

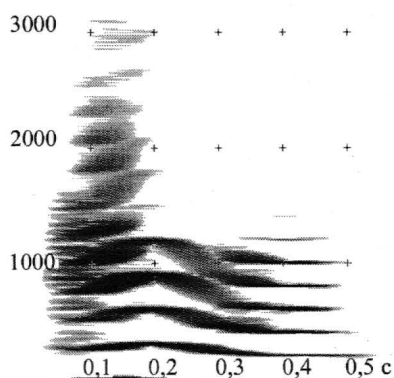


Рис.3. Сонограмма 1

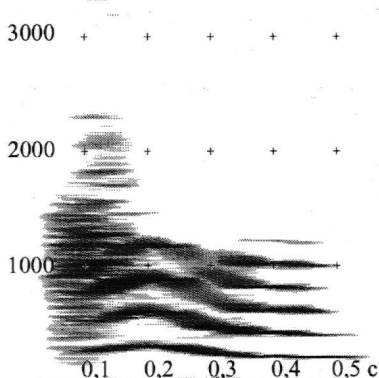


Рис.4. Сонограмма 2



Рис.5. Графическая разность сонограмм

Графическая разность показывает, как изменяется спектр сигналов и позволяет проводить сравнительный анализ спектрограмм на характерных участках речи. Изменение (искажение) спектральных и других характеристик достаточно наглядно анализируются графическим методом, но при этом мы сталкиваемся с той же проблемой, что и при субъективном анализе. Необходим эксперт, который обладает достаточными знаниями и опытом для проведения визуального анализа графического материала и принятия решения. Для получения количественных оценок наиболее эффективно применение анализа сонограмм СПМ.

Объективные методы оценки. Суть методов заключается в проведении эксперимента с двумя образцами вокодеров (рис.6) и получении группы оценок, позволяющих определить, какой из образцов (сонограммы сигналов 1 и 2), а по возможности и насколько, отличается от сонограммы тестового (эталонного) сигнала. В результате сравнительного анализа должны быть получены меры искажения и ряд других оценок, по которым можно сделать вывод о том, какой из образцов восстанавливает речевую информацию ближе к эталонному образцу.

Для измерения искажения распределения СПМ (psd) можно использовать ряд оценок. Представим данные сонограмм и соответственно их разности в виде двумерного массива. При подсчете суммарного искажения частотный и временной интервалы могут быть ограничены до необходимых в конкретном случае анализа, по времени – длительностью фрейма, фонемы, слога или слова, по частоте – в интересующем диапазоне.

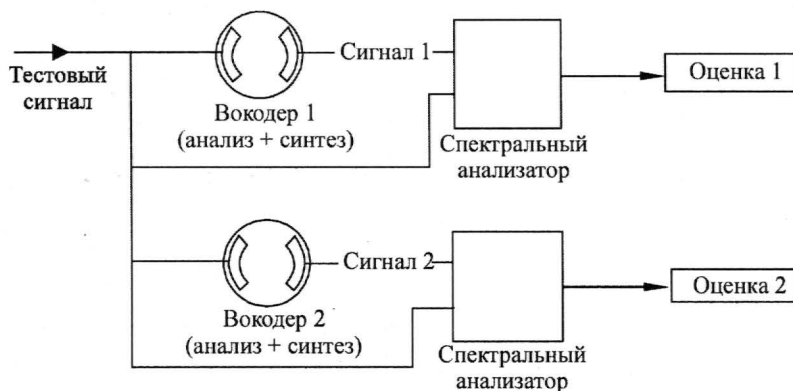


Рис.6. Схема проведения сравнительного анализа двух вокодеров

Подсчет суммарного, максимального и среднего значения искажения в интересующем частотно-временном диапазоне:

- подсчет суммарной разности (искажения) двух сонограмм

$$\sum_{t=T_1}^{T_2} \sum_{n=N_1}^{N_2} |\text{psd}[t, n] - \text{psd}'[t, n]|, \quad (3)$$

где $\text{psd}[t, n]$ и $\text{psd}'[t, n]$ – дискретные функции СПМ исходного и полученного в результате процедуры анализ-синтез сигналов соответственно; T_1, T_2 – индексы отсчетов начала и конца выбранного временного диапазона; N_1, N_2 – индексы отсчетов начала и конца выбранного частотного диапазона. В дальнейшем положим $T = T_2 - T_1$ и $N = N_2 - N_1$;

- максимальное и среднее значение искажения по частотно-временному диапазону (при $T = 1$ – по срезу времени, при $N = 1$ – частотному срезу):

$$\max_{t \in (T_1 \dots T_2), n \in (N_1 \dots N_2)} |\text{psd}[t, n] - \text{psd}'[t, n]|, \quad (4)$$

$$\frac{\sum_{t=T_1}^{T_2} \sum_{n=N_1}^{N_2} |\text{psd}[t, n] - \text{psd}'[t, n]|}{NT}; \quad (5)$$

- среднеквадратичное искажение спектральной плотности

$$\sqrt{\frac{\sum_{t=T_1}^{T_2} \sum_{n=N_1}^{N_2} (\text{psd}[t, n] - \text{psd}'[t, n])^2}{NT}}. \quad (6)$$

Средние значения СПМ по рассматриваемой частотно-временной области (5) и (6) могут использоваться также для получения относительных оценок.

Оценка искажения на основе отношения сигнал/шум. Отношение сигнал/шум (ОСШ) (Signal-to-Noise Ratio, SNR) – нормированный показатель погрешности (искажения) безразмерная величина. ОСШ определяется отношением

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} = \left(\frac{A_{\text{signal}}}{A_{\text{noise}}} \right)^2, \quad (7)$$

где P – средняя мощность; A – среднеквадратичное значение амплитуды. Оба сигнала измеряются в полосе пропускания системы. ОСШ часто выражается в децибелах:

$$\text{SNR}[\text{дБ}] = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} \right) = 20 \lg \left(\frac{A_{\text{signal}}}{A_{\text{noise}}} \right). \quad (8)$$

Для сигнала, представленного в виде наборов дискретных значений, выражение (8) будет иметь вид

$$\text{SNR} = \frac{\sum_{n=1}^N (S[n])^2}{\sum_{n=1}^N (S[n] - S'[n])^2}, \quad \text{SNR}[\text{дБ}] = 10 \lg \frac{\sum_{n=1}^N (S[n])^2}{\sum_{n=1}^N (S[n] - S'[n])^2}, \quad (9)$$

где $S[n]$ – неискаженный сигнал до преобразования, $S'[n]$ – искаженный в результате преобразования сигнал.

Для дискретной функции СПМ можно также рассчитать ОСШ

$$\text{psdSNR} = \frac{\sum_{t=T_1}^{T_2} \sum_{n=N_1}^{N_2} |\text{psd}[t, n]|}{\sum_{t=T_1}^{T_2} \sum_{n=N_1}^{N_2} |\text{psd}[t, n] - \text{psd}'[t, n]|}, \quad \text{psdSNR [дБ]} = 10 \lg \frac{\sum_{t=T_1}^{T_2} \sum_{n=N_1}^{N_2} |\text{psd}[t, n]|}{\sum_{t=T_1}^{T_2} \sum_{n=N_1}^{N_2} |\text{psd}[t, n] - \text{psd}'[t, n]|}. \quad (10)$$

AI – индекс артикуляции на основе psdSNR .

Для подсчета индекса AI весь частотный диапазон речевого сигнала разделяется на некоторое количество полос (около 20), в пределах которых определяется отношение сигнала к шуму [5]. Предполагается, что каждая частотная полоса вносит свой независимый вклад в разборчивость речи. Ширина полос выбирается таким образом, чтобы вклад каждой полосы в результирующую разборчивость (рис.7) был максимально одинаковым. В каждой полосе рассчитывается отношение сигнал/шум, взвешивается и суммируется для получения индекса артикуляции: $AI = \sum AI_j$, где AI – индекс артикуляции, $0 < AI < 1$; AI_j – вклад в индекс в j -й полосе частот, $0 < AI_j < 0,05$. Причем, для отношения сигнал/шум больше 30 дБ значение AI_j принимается равным 0,05, а для отношения сигнал/шум меньше 30 дБ эти значения определяются как $AI_j = 0,05(\text{psdSNR})_j/30$.

Аналитическая оценка слоговой разборчивости на основе psdSNR . Важнейшим параметром в области речепреобразования является разборчивость. Согласно ГОСТу [2] разборчивость – это «относительное количество правильно принятых слушателем элементов (слогов, слов, фраз)», иначе говоря, это «степень, с которой речь может быть понята (расшифрована) слушателями». Под этим понимается степень, с которой слушатели могут идентифицировать (понять смысл) фраз, слов, слогов и фонем. В соответствии с этим различаются виды разборчивости: фонемная, слоговая, словесная и фразовая, которые, однако, все связаны друг с другом и могут быть пересчитаны одна в другую [5].

Слоговую разборчивость можно оценить аналитически согласно формуле [7]:

$$S = 35 + 65 [1 - e^{-0,05 \text{SNR}_{\text{requ}}}], \quad (11)$$

где $\text{SNR}_{\text{requ}} = 0,027 \cdot \text{psdSNR}^2 + 1,26 \cdot \text{psdSNR} - 5,08$ (оценка предложена компанией AT&T), или $\text{SNR}_{\text{requ}} = 0,0602 \cdot \text{psdSNR}^2 + 0,285 \cdot \text{psdSNR} + 1,07$ (оценка предложена почтовым ведомством Великобритании).

Автоматизированное получение описанных оценок и мер позволяет оперативно оценивать тенденцию влияния вносимых в вокодер изменений на общую картину спектрального распределения энергии в речевом сигнале относительно эталонного.

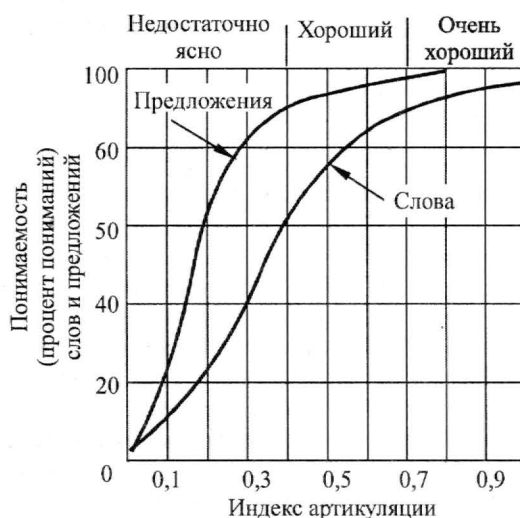


Рис. 7. Соотношение между разборчивостью и индексом артикуляции AI

Описанный в работе метод оценки качества речепреобразования учитывает специфику обработки речевых сигналов низкоскоростными вокодерами. В основе разработанной методики лежат аналитическая и программная модели речевых сигналов, позволяющие проводить сравнительный анализ искажений спектральной характеристики сигнала. Этот инструмент не может считаться альтернативой ГОСТам, но позволяет существенно упростить процедуру оценки в тех случаях, когда нет принципиальной необходимости в испытаниях согласно государственным стандартам. Практическая применимость метода подтверждена при проектировании ряда образцов вокодеров в рамках темы «Уступ-С» на предприятии ГУП НПП «СПУРТ» (г. Зеленоград).

Литература

1. ГОСТ Р 51061-97. Системы низкоскоростной передачи речи по цифровым каналам. Параметры качества речи и методы измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1997. – 24 с.
2. ГОСТ Р 50840-95. Передача речи по трактам связи. Методы оценки качества, разборчивости и узнаваемости. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 202 с.
3. ГОСТ 16600-72. Передача речи по трактам радиотелефонной связи. Требования к разборчивости речи и методы артикуляционных испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 93 с.
4. *Дворянkin С.В.* Цифровая обработка изображений динамических спектрограмм аудиосигналов в задачах безопасности речевой связи // *Специальная техника*. – 2000. – № 3. – С. 37–45.
5. *Алдошина И.А.* Основы психоакустики // <http://www.auditech.ru/doc/psychoacoustics/index1.htm>
6. *Демидов О.Ф., Ишуткин Ю.М., Лихницкий А.М.* Восприятие фазовых искажений в области частоты основного резонанса головки громкоговорителя. – <http://www.aml.nm.ru/perception.htm>
7. *Горелов Г.В., Ромашкова О.Н., Чан Туан Ань.* Качество управления речевым трафиком в телекоммуникационных сетях. – М.: Радио и связь, 2001. – 105 с.

Статья поступила
10 мая 2007 г.

Лихачев Александр Сергеевич – аспирант кафедры вычислительной техники МИЭТ. *Область научных интересов:* цифровая обработка сигналов, микроконтроллеры и микропроцессоры, программирование, программное моделирование.

Лупин Сергей Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники МИЭТ. *Область научных интересов:* информационно-управляющие и информационные системы, параллельные вычисления, кластерные вычислительные системы.

Информация для читателей журнала

«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Вы можете оформить подписку на журнал по каталогу «Газеты, журналы» Агентства «Роспечать» в любом почтовом отделении связи.

Подписной индекс

47570

Алгоритм проверки с помощью графа линейной модели на устойчивость

Ю.В.Епишин

ГУП «Предприятие перспективных исследований «Научный центр» (г. Москва)

Предложен алгоритм исследования линейной модели на устойчивость, работающий на графе модели. Приведены сравнения вычислительных затрат данного алгоритма и алгоритмов, работающих непосредственно с матрицей системы. Предложены методы ускорения работы графового алгоритма.

Существует ряд математических моделей в виде линейных систем обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, описывающих баланс некоторой замкнутой системы во времени. Примером такой системы может служить электрическая цепь [1] или биологическая популяция [2]. Данные модели могут быть представлены в виде графов: например, электрическая цепь представляет собой ориентированный граф, дугами которого являются проводники, а нагрузкой дуг – токи и напряжения. Некоторые топологические характеристики графа позволяют делать заключения относительно устойчивости модели, не прибегая к ее качественному анализу.

Целью настоящей работы является создание алгоритма проверки линейной модели на устойчивость на основе графа.

Дадим определение минимального графа [3]. Пусть $G = (V, E)$ – связный нагруженный ориентированный граф без петель и кратных дуг, $|V| = n$. Поставим ему в соответствие матрицу $B = B(G) = (b_{ij})$, где $b_{ij} > 0$ есть нагрузка дуги, ведущей из i -й в j -ю вершину, если в графе G эта дуга существует, и нуль в противном случае,

$i, j \in \overline{1, n}$. Обозначим $b_k = b_k(G) = \sum_{j=1}^n b_{kj}$, $k = \overline{1, n}$. Пусть $C = C(G)$ следующая матрица:

$$C = B^T - \text{diag}\{b_1, \dots, b_n\}. \quad (1)$$

Матрицу B будем называть матрицей нагрузки, а матрицу C – матрицей баланса графа G . Назовем граф $G = (V, E)$ минимальным, если $|E| = n - 1$ и для его матрицы баланса выполнено условие $\text{rank} C = n - 1$. Нетрудно убедиться, что $n - 1$ – это действительно наименьшее количество ненулевых элементов матрицы нагрузки, достаточное для того, чтобы ранг матрицы баланса был равен $n - 1$. Связный нагруженный ориентированный граф, который содержит в качестве остовного подграфа минимальный граф, называется сводимым к минимальному. Пусть граф $G = (V, E)$ является минимальным. Будем говорить, что граф $G' = (V', E')$ получен из графа G при помощи операции добавления входящей дуги, если $V' = \{v'\} \cup V$, $v' \notin V$, множество E' содержит все дуги из E , а также дугу с произвольной положительной нагрузкой, ведущую из вершины v' в произвольную вершину v графа G .

В работе [4] установлена связь ранга матрицы баланса с «лесом» графа, рассмотрены приложения, в частности проблема стабилизации движения летательных аппаратов. Можно показать, что матрица баланса устойчива по Ляпунову тогда и только тогда, когда каждая компонента связности соответствующего графа сводится к минимальному. Поэтому предлагаемый ниже алгоритм применим для исследования на устойчивость линейных моделей, в которых матрицей системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка является матрица баланса графа модели.

Утверждение 1. Связный нагруженный ориентированный граф минимален тогда и только тогда, когда его можно получить при помощи операции добавления входящей дуги из некоторого нагруженного графа с двумя вершинами и одной дугой.

Доказательство. 1. Докажем индукцией по числу вершин графа, что в результате применения операции добавления входящей дуги к минимальному графу получается минимальный граф.

Нагруженному графу с двумя вершинами и одной дугой соответствует матрица баланса ранга 1, следовательно граф минимален. Пусть граф $G=(V,E)$, $|V|=n$, минимален, а граф $G'=(V',E')$ получен из графа G при помощи операции добавления входящей дуги. Тогда $V'=\{v'\} \cup V$, где $v' \notin V$. Будем считать, что к множеству E добавляется дуга с нагрузкой $\beta > 0$, выходящая из вершины v' и входящая в вершину $v \in V$. Рассмотрим структуру матрицы нагрузки B' графа G' . Без ограничения общности можно считать, что вершина v' занумерована последней в графе G' , поэтому матрица B' в левом верхнем углу будет в качестве подматрицы порядка n содержать матрицу нагрузки B графа G . Из оставшихся элементов матрицы B' единственным ненулевым будет элемент β , находящийся в $(k+1)$ -й строке. Отсюда вытекает, что $(k+1)$ -й диагональный элемент матрицы баланса C' графа G' всегда отличен от нуля, и $(k+1)$ -й столбец матрицы C' линейно независим с остальными столбцами. Поэтому $\text{rank} C' = \text{rank} C + 1$, а поскольку граф G минимален и для его матрицы баланса C справедливо равенство $\text{rank} C = n - 1$, то граф G' также минимален.

Таким образом, граф, полученный последовательным применением операции добавления входящей дуги к нагруженному графу с двумя вершинами и одной дугой, является минимальным.

2. Пусть граф $G=(V,E)$, $|V|=n$, минимален. Покажем, что его можно получить при помощи операции добавления входящей дуги из некоторого нагруженного графа с двумя вершинами и одной дугой.

В графе G существует вершина v , имеющая нулевую полустепень захода, поскольку, если предположить, что в каждую из n вершин входит хотя бы одна дуга, получится противоречие, так как в минимальном графе всего $n-1$ дуг. Допустим, что из вершины v выходит более одной дуги. Тогда в соответствующей графу G матрице нагрузки будет менее $n-1$ ненулевых строк, следовательно, ранг матрицы баланса будет также меньше $n-1$. Итак, имеем, что из вершины v выходит в точности одна дуга. Рассмотрим теперь граф G' , полученный из графа G удалением вершины v и дуги, выходящей из нее. Граф G' имеет $n-1$ вершин и $n-2$ дуг, его матрица баланса C' получается из матрицы баланса C графа G путем вычеркивания одного столбца и одной строки, поэтому $\text{rank} C' = \text{rank} C - 1 = n - 2$, т. е. граф G' минимален. Теперь к графу G' применимы те же рассуждения, что и к графу G . По индукции получаем, что если в графе G в определенной последовательности удалить $n-2$ вершины и $n-2$ дуги, то можно получить некоторый нагруженный граф G_0 с двумя вершинами и одной дугой.

Рассмотрим теперь граф G_1 , полученный $(n-2)$ -кратным применением операции добавления входящей дуги к графу G_0 . При i -м применении операции будем добавлять именно ту нагруженную дугу, что была ранее на $(n-1-i)$ -м шаге удалена из графа G , $i = \overline{1, n-2}$. Ясно, что графы G и G_1 совпадают. Таким образом, граф G получен при помощи операции добавления входящей дуги из некоторого нагруженного графа с двумя вершинами и одной дугой. Утверждение доказано.

Замечание. Очевидно, что минимальность нагруженного графа не зависит от величин нагрузки его дуг. Поэтому можно также ввести понятие минимальности для ненагруженного графа. Пусть $G = (V, E)$ – связный ориентированный граф без петель и кратных дуг, $|V| = n$. Рассмотрим его матрицу смежности $B = B(G) = (b_{ij})$. Обозначим через b_k полустепень исхода k -й вершины графа G , $k = \overline{1, n}$. Определим матрицу баланса $C = C(G)$ графа G следующим образом:

$$C = B^T - \text{diag}\{b_1, \dots, b_n\}.$$

Назовем граф $G = (V, E)$ минимальным, если $|E| = n-1$, и для его матрицы баланса выполнено условие $\text{rank} C = n-1$. Связный ориентированный граф, который содержит в качестве остовного подграфа минимальный граф, будем называть сводимым к минимальному. Нетрудно заметить, что нагруженный граф является минимальным тогда и только тогда, когда соответствующий ненагруженный граф является минимальным.

Стоком ориентированного графа будем называть такую его вершину, полустепень исхода которой равна нулю. Входящим деревом называется связный ориентированный граф без циклов, содержащий вершину, достижимую из любой вершины графа. Известно, что связный ориентированный граф является входящим деревом тогда и только тогда, когда он имеет в точности один сток, а у всех остальных вершин полустепень исхода равна 1 [5].

Очевидно, что утверждение 1 справедливо также для ненагруженного графа: связный ориентированный граф минимален тогда и только тогда, когда его можно получить при помощи операции добавления входящей дуги из некоторого графа с двумя вершинами и одной дугой. С другой стороны, легко заметить, что ориентированный граф можно получить при помощи операции добавления входящей дуги из некоторого графа с двумя вершинами и одной дугой тогда и только тогда, когда он является входящим деревом. Поэтому справедливо следующее утверждение.

Утверждение 2. Граф минимален тогда и только тогда, когда он является входящим деревом.

Из утверждения 2 следует, что ориентированный граф является сводимым к минимальному тогда и только тогда, когда граф содержит остовное входящее дерево (ОВД).

Для проверки связного ориентированного графа на наличие ОВД можно использовать следующую теорему, принадлежащую Татту [5]: для каждого ориентированного графа G с n вершинами и матрицей смежности B алгебраическое дополнение любого элемента i -й строки матрицы $M_{od} = -B + \text{diag}\{b_1, \dots, b_n\}$,

$b_k = \sum_{j=1}^n b_{kj}$, $k = \overline{1, n}$, равно числу ОВД, у которых i -я вершина является стоком.

Заметим, что алгебраические дополнения A_{ij} каждого элемента i -й строки матрицы M_{od} неотрицательны. Действительно, $A_{ii} \geq 0$, поскольку соответствующий минор включает произведение $n-1$ диагональных элементов матрицы M_{od} (внедиагональные элементы которой 0 или (-1)). Затем при переходе к соседнему элементу i -й строки будет происходить чередование знака минора (он будет определяться знаком произведения элементов его главной диагонали), и знак алгебраического дополнения будет оставаться неизменным. Учитывая неравенство $A_{ij} \geq 0$, $j = \overline{1, n}$, из разложения равно нулю определителя матрицы M_{od} по i -й строке получим, что $A_{ij} = A_{ik}$ для любых $j, k \in \overline{1, n}$. Следовательно, чтобы установить, содержит ли граф G ОВД, достаточно найти хотя бы одну такую строку соответствующей матрицы M_{od} , алгебраическое дополнение произвольного элемента которой не есть нуль. В наихудшем случае реализация такого поиска потребует $n(n-1)(n-2)$ операций умножения, $n(n-2)$ операций сложения и n операций сравнения, т. е. асимптотически $O(n^3)$ операций.

Столько же по порядку операций будет затрачено на непосредственное вычисление ранга матрицы баланса приведением ее к треугольному виду. Для обоих этих подходов характерен значительный рост вычислительной погрешности вследствие обилия мультипликативных операций.

Можно предложить альтернативный алгоритм проверки связного ориентированного графа $G = (V, E)$ на наличие ОВД. Напомним [5], что ориентированный граф называется сильно связным, если любые две его различные вершины соединены некоторым ориентированным путем. Сильно связной компонентой ориентированного графа называется максимальный сильно связный подграф данного графа. Пусть $\{S_1, S_2, \dots, S_t\}$ – сильно связные компоненты ориентированного графа G . Факторграфом G^* графа G называется ориентированный граф, множество вершин которого есть множество $\{S_1, S_2, \dots, S_t\}$, а дуга соединяет вершину S_i с вершиной S_j , если в графе G имеется по крайней мере одна дуга, соединяющая некоторую вершину компоненты S_i с некоторой вершиной компоненты S_j .

Утверждение 3. Граф G содержит ОВД тогда и только тогда, когда его факторграф G^* содержит ОВД.

Доказательство. Пусть граф $G = (V, E)$ содержит ОВД. Без ограничения общности будем считать, что вершина $v_1 \in V$ является стоком ОВД. Покажем, что факторграф $G^* = (V^*, E^*)$, $V^* = \{S_1, S_2, \dots, S_t\}$, также содержит ОВД. Существует такое $j \in \overline{1, t}$, что $v_1 \in S_j$. Рассмотрим произвольную вершину S_i ($i \neq j$) факторграфа G^* . Поскольку граф G содержит ОВД, для каждой его вершины v , содержащейся в S_i , найдется ориентированный путь, ведущий из v в сток v_1 , а значит, в факторграфе G^* будет существовать ориентированный путь из вершины S_i в выделенную вершину S_j . Следовательно, факторграф G^* содержит ОВД со стоком в вершине S_j .

Пусть факторграф $G^* = (V^*, E^*)$, $V^* = \{S_1, S_2, \dots, S_t\}$, содержит ОВД. Будем считать, что стоком ОВД является вершина S_j . Покажем, что граф $G = (V, E)$ также содержит ОВД. Зафиксируем произвольную вершину v' графа G , содержащуюся в S_j .

Рассмотрим произвольную вершину $v \neq v'$ графа G . Если $v \in S_j$, то заведомо найдется ориентированный путь, соединяющий v с v' . Пусть $v \in S_i$, $i \neq j$. Так как факторграф G^* содержит ОВД, то существует ориентированный путь вида $S_i, S_i, \dots, S_i, S_j$. Следовательно, в графе G существуют вершины $v^i \in S_i$, $v^j \in S_j$, $v_{1,2}^i \in S_i$, $l = \overline{1, r}$, такие, что в графе G существуют дуги $(v^i, v_1^i), (v_2^i, v_1^i), \dots, (v_{l-1}^i, v_1^i), (v_l^i, v^j)$. Вследствие сильной связности существуют ориентированные пути, ведущие из вершины v в вершину v^i , из вершины v^j в вершину v' , а также из вершины v_1^i в вершину v_2^i , $l = \overline{1, r}$. Таким образом, в графе G существует ориентированный путь $v, v^i, v_1^i, v_2^i, \dots, v_{l-1}^i, v_l^i, v^j, v'$, и граф G содержит ОВД со стоком в вершине v' . Утверждение доказано.

Построим сначала факторграф $G^* = (V^*, E^*)$ исследуемого графа $G = (V, E)$. Алгоритм, решающий эту задачу, потребует $O(|V| + |E|)$ операций [6].

Утверждение 4. Ориентированный граф G' без ориентированных циклов содержит ОВД тогда и только тогда, когда в графе G' существует в точности один сток.

Доказательство. Пусть v_0 – единственный сток графа G' . Покажем, что всякая вершина $v \neq v_0$ графа G' соединена с v_0 ориентированным путем, что и будет означать существование ОВД в графе G' . Предположим обратное, т. е. допустим, что найдется вершина $v' \neq v_0$ графа G' , не связанная ориентированным путем с v_0 . Пусть $P = v', v^1, v^2, \dots, v^{k-1}, v^k$ – максимальный ориентированный путь из вершины v' в графе G' . Допустим, что существует дуга (v^k, v_k^1) , выходящая из вершины v^k . Вершина v_k^1 не может содержаться в пути P , поскольку граф G' не имеет ориентированных циклов. Но тогда путь P не является максимальным. Значит, в графе G' не существует дуг, выходящих из вершины v^k . Получено противоречие с единственностью стока графа G' .

Докажем обратное утверждение. Предположив что из каждой вершины графа G' выходит хотя бы одна дуга, получим, что граф содержит ориентированный цикл, чего не может быть. Значит, в графе G' существует сток v_0 . Если в графе G' более одного стока, то граф не может содержать ОВД, поскольку в этом случае в графе есть как минимум две вершины (эти стоки), не связанные ориентированными путями, и поэтому ни одна из них не может быть стоком ОВД. Утверждение доказано.

Известно, что факторграф G^* не имеет ориентированных циклов, поэтому граф G^* содержит ОВД тогда и только тогда, когда в графе G^* существует в точности один сток. Таким образом, чтобы установить, содержится ли ОВД в факторграфе G^* достаточно проверить наличие в графе G^* двух различных вершин, имеющих нулевую полустепень исхода. Это можно сделать за линейное время $O(|V^*|)$. В целом же реализация предложенного алгоритма проверки связного ориентированного графа $G = (V, E)$ на сводимость к минимальному требует асимптотически $O(|V| + |E|)$ операций, т. е. данный алгоритм имеет оптимальное время работы.

Автор выражает искреннюю благодарность доктору физико-математических наук Р.М. Колпакову за ценные замечания по данной работе, а также доктору физико-математических наук И.Б. Кожухову за его постоянную поддержку и интерес к теме исследования.

Литература

1. *Murota K.* Matrices and Matroids for System Analysis. – Berlin etc: Springer, 2000. – 483 p.
2. *Свирижев Ю. М., Логофет Д.О.* Устойчивость биологических сообществ. – М.: Наука, 1978. – 350 с.
3. *Епишин Ю.В.* Графовый подход к исследованию линейных моделей на устойчивость // Системный анализ и информационно-управляющие системы: Сб. научн. тр. – М.: МИЭТ, 2006. – С. 54–61.
4. *Агаев Р.П., Чеботарев П.Ю.* Лапласовские спектры оргграфов и их приложения // Автоматика и телемеханика. – 2005. – № 5. – С. 47–62.
5. *Харари Ф.* Теория графов. – 3-е изд. – М.: КомКнига, 2006. – 296 с.
6. *Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К.* Алгоритмы: построение и анализ: 2-е изд. – М.: Вильямс, 2007. – 1296 с.

Статья поступила
16 апреля 2007 г.

Епишин Юрий Владимирович – аспирант ГУП «Предприятие перспективных исследований «Научный центр» (г. Москва). *Область научных интересов:* математическое моделирование, дифференциальные уравнения, теория графов.

**Четырнадцатая ежегодная международная научно-техническая конференция
студентов и аспирантов
"РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА"
28–29 февраля 2008 г. Москва**

Организаторы

Министерство образования и науки Российской Федерации
Московский энергетический институт (технический университет)
Академия электротехнических наук
Ассоциация международных отделов технических университетов стран
Центральной и Восточной Европы (АМО)
Институт инженеров по электротехнике и электронике США (IEEE)
(студенческая секция)

Научные направления: радиотехника и связь; электроника; медицинская электроника; информационные технологии; электротехника, электромеханика и электротехнологии; инженерная экология; экономика и менеджмент; энергетика и экономика предприятий; теплофизика; теплоэнергетика; энергомашиностроение; электроэнергетика

Адрес оргкомитета

Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14, МЭИ (ТУ), ИРЭ, деканат РТФ.
На Четырнадцатую конференцию студентов и аспирантов.
Телефоны: (495) 362-7309, (495) 362-7104 (Зайко Елена Семеновна)
E-mail: ISTC@mpei.ru

Применение генетических алгоритмов для оптимизации структуры метаданных Java-приложения

Д.А.Погибельский

Московский физико-технический институт (государственный университет)

С.А.Никитов

Институт радиотехники и электроники РАН

Исследован процесс выполнения кода Java-приложения с точки зрения работы с метаданными. Предложен формальный критерий оценки оптимальности организации структуры метаданных, учитывающий требования к производительности системы и потреблению системных ресурсов. Изучена возможность применения генетических алгоритмов для ее оптимизации. Эффективность иллюстрируется примером.

Появление в середине 90-х годов технологии программирования Java, привело к бурному развитию и распространению концепции управляемого кода. На сегодняшний день технологии Java и .NET прочно закрепились на лидирующих позициях в вопросах разработки программного обеспечения. Их достоинства хорошо известны и заключаются в безопасности и переносимости кода, простоте и удобстве для разработчика. В то же время, производительность управляемого кода, выполняемого в контролирующем окружении, как правило, ниже по сравнению с традиционным неуправляемым. Это происходит из-за добавления дополнительного промежуточного слоя программного обеспечения между кодом исполняемого приложения и операционной системой. Этот слой и получил название контролирующего окружения. Его можно рассматривать как программную модель некоторого унифицированного центрального процессора, главной задачей которого является оптимальное выполнение команд универсального промежуточного языка. В случае Java этот язык называется байткодом.

Традиционно эффективность выполнения байт-кода повышалась либо путем его упрощения, как это в настоящий момент сделано в технологии Java Card [1], применяемой на микропроцессорных картах, либо фактическим превращением интерпретатора в компилятор. Эта технология получила название *just-in-time* компиляция (JIT). На сегодняшний день по этому пути пошло развитие всех высокопроизводительных контролирующих окружений (Microsoft .NET, Sun Microsystems Java 2, Mono). К сожалению, применение JIT-компиляторов не всегда возможно, в частности, из-за их отсутствия для большинства аппаратно-программных платформ. В этом случае необходимо повышать непосредственно производительность интерпретатора. На сегодняшний день исследования этих вопросов сводятся в основном к оптимизации интерпретатора для определенной, заранее выбранной аппаратно-программной платформы. Повышение производительности происходит за счет выбора оптимальных алгоритмов и структур данных, а также использования специфической функциональности целевой платформы [2].

Вопросы разработки математических моделей как интерпретаторов, так и JIT-компиляторов, позволяющих повысить производительность за счет выявления информационных зависимостей между метаданными приложения, на сегодняшний день практически не исследованы.

Целью исследования является разработка формального критерия для оценки и методов для повышения эффективности организации мета-данных Java-приложения за счет исследования математической модели процесса его выполнения.

Представление метаданных во время выполнения программы удобно моделировать взвешенным ориентированным графом $G = (V, E)$ (см. рисунок). Его вершинам V соответствуют элементы метаданных, а ребра E представляют информационные зависимости между ними. Так ребро, проведенное из a в b означает, что, имея a , можно вычислить b . Стоимость такой операции вычисления равна весу ребра, который будет определен ниже.

Вершина R соответствует указателю на начало управляемой памяти, вершины $C(1), \dots, C(M_c)$, соответствуют данным загруженных классов. В каждом классе есть $C_p(1), \dots, C_p(M_{cp})$ набор статических определений, F начало блока определения переменных, $F(1), \dots, F(M_f)$ определения переменных, M начало блока определения методов, $M(1), \dots, M(M_m)$ определения методов. Через M_c, M_{cp}, M_f, M_m обозначены соответственно математические ожидания количества классов в приложении, длины списков определений, переменных и методов в каждом классе приложения. Другие вершины обозначают: s размер переменных класса; ts размер объекта класса, с учетом унаследованных переменных; n имя класса; sn имя родительского класса; sr ссылка на одну из вершин C , соответствующую родительскому классу. Выполнение каждой команды байт-кода Java сводится к последовательности операций поиска путей между двумя вершинами на рассматриваемом графе [5]. Такие операции будем называть элементарными, пусть они составляют множество Z . Например, поиск имени класса $C(1)$ по пути между $C(1)$ и n . Поиск одного из классов по имени соответствует последовательному просмотру всех вершин $C(1), \dots, C(M_c)$, и проведению для каждой из них поиска имени. На практике для ускорения таких операций поиска пользуются хэш-таблицами. На графе они промоделированы узлами CH для классов и CF и CM для полей и методов внутри класса, соответственно.

Отметим, что множество E может состоять из ребер двух типов: ссылки получаемые «естественным путем», при загрузке связного списка данных с диска в память и ссылки, добавляемые дополнительно для ускорения навигации по структуре метаданных. Первые составляют множество E_0 и на рисунке изображены сплошными линиями, а вторые составляют множество \tilde{E} . Они изображены пунктиром и помечены числами от 1 до 12. Очевидно, что $E_0 \cap \tilde{E} = \emptyset$ и любая конфигурация E может быть представлена как $E = E_0 \cup E'$, где $E' \subset \tilde{E}$. Добавление в граф ребер второго типа сопряжено с дополнительными расходами памяти. Считая для простоты, что эффективность работы системы определяется лишь временем выполнения приложения и требуемым объемом памяти, поставим каждому ребру в соответствие вес, заданный как вектор $\vec{w} = (w_c, w_m)^T$. Компонента w_c показывает вычислительную сложность алгоритма перехода между вершинами, а w_m – требуемый объем дополнительной памяти для организации такого ребра. Характерно, что $w_m = 0$ для ребер из E_0 и $w_c = 1$ для ребер из \tilde{E} . Сложности алгоритмов в каждом конкретном случае можно оценить теоретически [3] и уточнить в соответствие с их реализацией [4]. Для оценки эффективности введем вектор системных приоритетов $\vec{q} = (q_c, q_m)^T$, пусть $0 < q_m, q_c$ и $q_m + q_c = 1$. Чем больше первая компонента, тем менее желательна нагрузка на процессор, чем больше вторая – тем желательнее меньше использовать оперативную память.

В первом приближении набор команд байт-кода Java можно разделить на $n_c = 4$ класса: «арифметические», доступ к переменным объекта, доступ к методам объекта, создание нового объекта [5]. Более глубокое расщепление принесет большую гибкость, но мы рискуем потерять наглядность. Для каждого из рассматриваемых классов существует строгая последовательность элементарных операций $\{z_k\}_{k=0}^{N_j}$, N_j – длина этой последовательности, $j = 1, \dots, n_c$, и $z_k \in Z$. Стоимость выполнения команды байт-кода можно оценить как

$$\bar{l}_j(E) = \sum_{k=0}^{N_j} T(E, z_k),$$

где $T(E, z_k)$ оператор, определяющий в зависимости от конфигурации множества E сумму весов ребер входящих в путь, соответствующий операции z_k . Для класса «арифметических» команд, включающего в себя все операции с локальными переменными, положим $\bar{l}_1 \equiv (1, 0)^T$. Введем вектор $\bar{\xi} = (\xi_1, \dots, \xi_{n_c})$, задающий частотное распределение для встречающихся в приложении команд байткода каждого класса. Тогда можно составить функционал для расчета математического ожидания сложности выполнения Java-приложения:

$$J(\bar{\xi}, \bar{q}, E) = \sum_{j=1}^{n_c} \xi_j \bar{q}^T \bar{l}_j(E).$$

Если $\bar{\xi}$ и \bar{q} рассматривать как параметры, то задача оптимального выполнения байт-кода Java сводится к задаче структурной оптимизации множества E за счет оптимального выбора ребер, формирующих множество E' . Пространством поиска является множество всех подмножеств множества \tilde{E} , обозначенное как O , каждый его элемент задает допустимую конфигурацию множества ребер графа. Формально задача оптимизации может быть записана следующим образом:

$$o^* = \arg \min_{o \in O} J(\bar{\xi}, \bar{q}, E_0 \cup o).$$

Применение классических методов оптимизации для решения этой задачи крайне затруднительно из-за сложности математической модели. В решении подобных задач хорошо себя зарекомендовали генетические алгоритмы (ГА) [6, 7]. Поскольку теоретические обоснования методики ГА выходят за рамки данной работы, то при решении поставленной задачи оптимизации применялись простейшие и тщательно проверенные методы [9].

ГА осуществляет поиск в хемминговом пространстве бинарных строк соответствующей размерности, поэтому, прежде чем применить к решению задачи классический ГА [9], определим преобразование представления. Каждому подмножеству \tilde{E} поставим в соответствие бинарную строку длины L ($L = 12$) следующим образом:

$$e: O \rightarrow H_L, \text{ пусть } e(o) = (\chi_o(1), \dots, \chi_o(L)),$$

где $\chi_o(i)$ – характеристическая функция множества o . Она показывает, входит ли в множество o , ребро, помеченное на рисунке числом i . В терминах ГА элементы H_L называются хромосомами, а элементы O – особями. Очевидно, что такое преобразование представления обратимо и $\exists e^{-1}: H_L \rightarrow O$ так, что $\forall h \in H_L \exists e^{-1}(h) \in O$. Это позволит эффективнее использовать аппарат ГА для поиска решения.

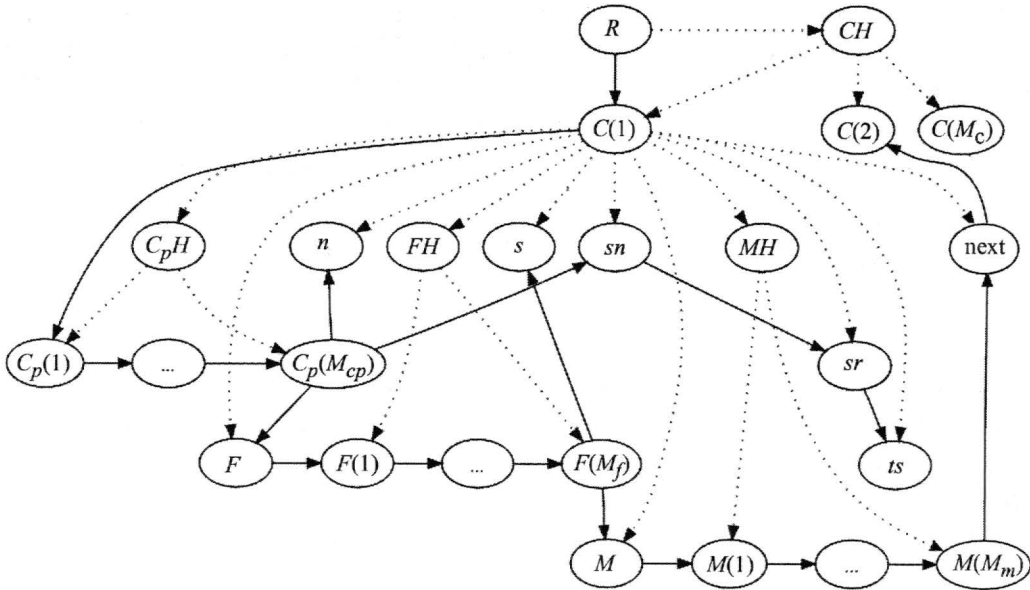


Схема информационных зависимостей метаданных Java-приложения

Общая схема работы ГА выглядит следующим образом [8].

1. Случайным образом формируется начальная популяция I_0 . Способ ее выбора влияет на скорость, но не на факт сходимости поиска. Текущим поколением объявляется начальная популяция: $I \leftarrow I_0$. Стрелка влево обозначает операцию присваивания. Наилучшая особь определяется как

$$o^* \leftarrow \arg \max_{h \in I} f(e^{-1}(h)).$$

2. Анализируется условие остановки.

2.1. Осуществляется переход к новому поколению. Пока $|I_n| < N$

- выполняется селекция $X = S(I)$;
- выполняется скрещивание $Y = B(X)$;
- выполняется мутация $\forall g \in Y \Rightarrow g \leftarrow M(g)$;
- родители и потомство переносятся в новое поколение: $I_n \leftarrow I_n \cup X \cup Y$.

2.2. Новое поколение объявляется текущим: $I \leftarrow I_n$. Новая наилучшая особь определяется как

$$o^* \leftarrow \max \left(o^*, \arg \max_{h \in I} f(e^{-1}(h)) \right).$$

На этапе селекции к имеющемуся поколению I применяется оператор $S: I \rightarrow 2^I$, который выбирает из I некоторое его подмножество. В данной работе используется пропорциональный оператор селекции: в X отбирается ровно два родителя и для каждого элемента h вероятность быть выбранным пропорциональна его приспособленности:

$$P\{h \in X\} = \frac{f(e^{-1}(h))}{\sum_{g \in I} f(e^{-1}(g))}.$$

На этапе скрещивания действует оператор скрещивания $B: 2^{H_L} \rightarrow 2^{H_L}$. В данной работе используется простейший одноточечный оператор скрещивания, поскольку его

характеристики хорошо изучены и качественно незначительно уступают характеристикам более сложных операторов [10, 11]. Его действие заключается в том, что случайным образом выбирается $k \in N: 1 \leq k \leq L$, обе родительские хромосомы разрезаются перед k -м битом и обмениваются фрагментами с k -го по L -й бит.

На этапе мутации действует оператор $M: H_L \rightarrow H_L$. Он с небольшой вероятностью $p_m \in (0,1)$ инвертирует каждый бит аргумента. Например, вероятность того, что хромосома $h = [0000]$ превратится в хромосому $h' = [1010]$, составляет $p\{h \rightarrow h'\} = p_m(1-p_m)p_m(1-p_m)$. Таким образом, с ненулевой вероятностью любая хромосома может превратиться в любую. Этот факт важен для предотвращения преждевременной сходимости в небольших поколениях. Этим же объясняется, почему выбор начального поколения не критичен для результата поиска.

В качестве условия остановки алгоритма рассматривается выполнение следующих трех условий.

1. Поиск сошелся. Под этим будем понимать, что

$$\frac{1}{N} \sum_{h \in I} f(h) > \theta, \quad f(o^*)$$

где θ – константа отсечения, в данном случае $\theta = 0,9$.

2. Сгенерировано необходимое для перемешивания число поколений. Показано, что минимально необходимое для распространения генов число поколений при одноточечном скрещивании пропорционально $O(L \ln L)$ [10]. В рассматриваемом случае будем считать, что перемешивание гарантированно произошло, если

$$t > t_{\min} = \Theta L \ln L, \text{ где } \Theta = 5.$$

Для $L = 12$ получаем $t_{\min} = 150$.

3. Количество вычислений функции f не превосходит $\alpha |H_L|$, где $\alpha = 0,25$.

Построим целевую функцию f . Поскольку она должна быть ограниченной и положительно определенной и принимать на «наилучшем» элементе наибольшее значение, то можно положить

$$f(o) = \frac{1}{J(\bar{\xi}, \bar{q}, E_0 \cup o)}.$$

Для проведения численного эксперимента на языке Java был разработан программный комплекс, реализующий описанные выше алгоритмы. Моделирование проводилось для двух численностей поколения N . Оптимальная структура E исследовалась для двух типов приложения. Одно приложение, разработано с преобладанием объектно-ориентированного подхода, свойственного таким языкам, как Java, другое с преобладанием классического, процедурного, свойственного языкам типа C или FORTRAN. Для первого приложения характерно равномерное распределение команд по классам. В то время как для второго характерно явное преобладание «арифметических» команд: $\xi_1 \gg (\xi_2 + \xi_3 + \xi_4)$ [12]. Характерные [12] значения величин $M_c = 20$, $M_{cp} = 80$, $M_f = 20$, $M_m = 20$, $M_{inh} = 5$ (где M_{inh} – средняя длина ветви в дереве наследования). Результаты эксперимента представлены в таблице. Для двух размеров популяций указано количество вычислений функционала J и указана хромосома оптимального графа. Они наглядно иллюстрируют зависимость оптимальной структуры графа от заданных $\bar{\xi}$ и \bar{q} .

Результаты численного эксперимента

q_m	ξ_1	ξ_2	ξ_3	ξ_4	ξ_1	ξ_2	ξ_3	ξ_4
	0,90	0,04	0,05	0,01	0,50	0,20	0,20	0,10
	$N=24$	$N=96$	σ^*		$N=24$	$N=96$	σ^*	
0,1	154	507	00000000010		152	520	00000000011	
0,3	150	547	01000000010		148	542	000000010011	
0,5	163	553	001001001010		160	606	100000100111	
0,7	148	712	010000001011		168	637	001000101110	
0,9	156	563	011000110110		147	588	100000100111	

Предложенный метод оптимизации структуры метаданных с помощью ГА позволяет существенно ускорить решение задачи структурной оптимизации по сравнению с поиском полным перебором. Есть основания считать, что надлежащий выбор ГА и адекватная детализация системы команд байт-кода позволят, оперативно отслеживая частотные характеристики команд, производить поиск оптимальной структуры метаданных прямо во время выполнения Java-приложения. Это принесет большую гибкость и повысит эффективность самоадаптации виртуальной машины Java к выполняемому программному коду.

Литература

1. **Clausen L.R.** Java bytecode compression for low-end embedded systems // ACM Transactions on Programming Languages and Systems. – 2000. – Vol. 22, N 3. – P. 471–489.
2. **Gagnon E.** A portable research framework for the execution of Java bytecode // Ph.D. Thesis, School of Computer Science McGill University. – Montreal, 2002. – 138 P.
3. **Кормен Т.Х., Лейзерсон Ч.И., Ривест Р.Л., Штайн К.** Алгоритмы: построение и анализ. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2005. – 1296 с.
4. **Седжвик Р.** Фундаментальные алгоритмы на С.: Пер. с англ. – СПб: ООО «ДиаСофтЮП», 2003. – 1136 с.
5. **Lindholm T., Yellin F.** The Java virtual Machine Specification. – Addison-Wesley, 1999. – 473 P.
6. **Goldberg D.E.** Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989. – 412 P.
7. **Еремеев А.В.** Разработка и анализ генетических и гибридных алгоритмов для решения задач дискретной оптимизации: Дисс. канд. физ.-мат. наук. – Омск, 2000.
8. **Nissen V.** Einführung in evolutionäre algorithmen. — Braunschweig: Vieweg, 1997. – P. 33–110.
9. **Holland J.H.** Adaptation in Natural and Artificial Systems. // The University of Michigan Press. – 1975.
10. **Prugel-Bennett A.** The mixing rate of different crossover operators // Foundations of Genetic Algorithms 6. – 2001. – P. 261–274.
11. **De Jong K.A., Spears W.M.** A formal analysis of the role of multi-point crossover in genetic algorithms // Annals of Mathematics and Artificial Intelligence. – 1992. – № 5(1). P. 1–26.
12. **Dieckmann S., Holzle U.** A Study of the Allocation Behavior of the SPECjvm98 Java Benchmarks // Technical Report: TRCS98-33, University of California, Santa Barbara, CA, USA, 1998.

Статья поступила
3 июня 2007 г.

Никитов Сергей Аполлонович – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора Института радиотехники и электроники РАН, заведующий кафедрой прикладных информационных технологий МФТИ. *Область научных интересов:* распределенные телекоммуникационные системы, проблемы обработки и передачи сигналов, новые методы и подходы в теории распознавания изображений, технологии защиты информации.

Погибельский Дмитрий Александрович – аспирант кафедры прикладных информационных технологий МФТИ. *Область научных интересов:* математическое моделирование, обработка данных, системное программирование.

ПРОБЛЕМЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 004.9:378

Вариативное управление актуализацией знаний в учебном процессе

О.И.Лисов, Н.С.Гриненко, Ко Ко Аунг

**Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)**

Рассмотрены вопросы вариативного управления процессом актуализации знаний в процессе обучения с помощью современных интеллектуальных информационных технологий. Представлены аспекты технологии вариативного управления, основанные на базовых технологиях управления в иерархических многоуровневых системах. Обсуждается построение контента программно-методических комплексов вариативного управления актуализацией знаний в учебном процессе.

Тенденции развития высшей школы связаны с наметившимся переходом к компетентностному подходу в процессе обучения, который предполагает большую направленность процесса обучения на практические потребности общества, увеличение влияния личных качеств обучаемых на управление процессом обучения, переосмысление роли учителя в процессе обучения с учетом развития информационных средств представления учебных материалов и их использования.

Понятийный аппарат, характеризующий смысл компетентностного подхода в образовании, еще не устоялся. Тем не менее можно выделить некоторые существенные черты этого подхода. Компетентностный подход – это совокупность общих принципов определения целей образования, отбора содержания образования, организации образовательного процесса и оценки образовательных результатов. К числу таких принципов относятся следующие положения:

- смысл образования заключается в развитии у обучаемых способности самостоятельно решать проблемы в различных сферах и видах деятельности на основе использования социального опыта, элементом которого является и собственный опыт учащихся;
- содержание образования представляет собой дидактически адаптированный социальный опыт решения познавательных, мировоззренческих, нравственных, политических и иных проблем;
- смысл организации образовательного процесса заключается в создании условий для формирования у обучаемых опыта самостоятельного решения познавательных, коммуникативных, организационных, нравственных и иных проблем, составляющих содержание образования;
- оценка образовательных результатов основывается на анализе уровней образованности, достигнутых учащимися на определенном этапе обучения.

«Компьютеризация» созданных и создаваемых учебно-методических материалов, часто осуществляемая простым их переводом в электронную форму, не отвечает потребностям как обучаемых, так и преподавателей, а также возможностям современных интеллектуальных технологий.

Можно сказать, что как появление ЭВМ привело к «революции» в математическом аспекте знаний и возможности в решении теоретических и практических задач специа-

листа, так как развитие информационных технологий, в том числе интеллектуальных, средств интерактивного общения человека с ЭВМ, обуславливает необходимость и возможность, если не «революционного», то существенного изменения технологии обучения, что и декларировано в определении компетентностного подхода.

Основными факторами, которые определяют развитие технологии учебного процесса, являются:

- учет психологических особенностей обучаемого как при индивидуальном обучении, так и при их объединении в учебные группы;
- управление процессом обучения с учетом уровня индивидуальной «обученности», т.е. объема усвоенных знаний;
- обеспечение практической направленности приобретаемых знаний в сочетании с необходимой абстрактностью (в том числе и кажущейся обучаемому на определенном этапе обучения);
- мотивация процесса обучения (в том числе и использование политики «кнута и пряника»);
- поощрение склонности обучаемых к творческому характеру реализации актов учебного процесса;
- склонность обучаемых к самостоятельности в выборе способов изучения учебного материала или в предрасположенности к полному подчинению преподавателю;
- возможность представления обучаемому знаний, интересующих его, или необходимых для получения нужной «компетентности», входящих в «область научных интересов» и компетентности преподавателя.

Современные технические и информационные средства позволяют осуществлять хранение, отображение, передачу и использование учебной информации практически в любом удобном для слушателя форме. Поэтому актуальной задачей на сегодняшний момент является развитие принципов и методов управления учебным процессом, использующим все возможности информационных интеллектуальных технологий, максимально ориентированных на личностные качества обучаемых, и которые могут быть реализованы в системах управления учебным процессом.

Учет психологических особенностей обучаемых носит как индивидуальный, так и групповой характер. В работе преподавателя с каждым конкретным обучаемым используется принцип когнитивности, т.е. работа преподавателя с каждым конкретным обучаемым ведется с учетом его личностно-психологических особенностей, творческих способностей, индивидуальных качеств.

В группе могут быть собраны обучаемые с различными психологическими, творческими, индивидуальными свойствами. Исторически группа организовывалась по принципу «философского треугольника». Данный подход изначально рассматривал подбор преподавателем группы из двух учеников, один из которых выполнял роль «генератора идей», а второй являлся «критиком». Преподаватель выполнял роль лидера и направляющего. Использование принципа «философского треугольника» в обучении является начальным способом организации тьюторного образования. В современном обучении данный принцип так же может быть использован при наборе большой группы обучаемых (с учетом равенства количества противоположных психологических типов обучаемых) или в виде «философского многоугольника», представляющего собой группу обучаемых с различными психологическими типами: «генератор идей», «критик», «лидер», «практик», «судья» и т.д. Состав группы в определенной мере зависит и от компетентности преподавателя. Личностно-психологический состав группы может поощрять работу одного преподавателя и быть противопоказан другому. Каждый

преподаватель подбирает группу «под себя». Этот метод (принцип) давно и с успехом применяется в художественных творческих учебных заведениях. В консерватории, театральных вузах абитуриент не просто поступает в институт, а сразу попадет в «Класс профессора (выдающихся артистов, музыкантов...)...». Руководитель «Класса...», во-первых, имеет определенные права оценивать абитуриента не только по «баллам», но и по другим признакам, например: «Мне нравится необычная манера его исполнения (мышления). Я его беру в свой класс». Во-вторых, руководитель «Класса...» если не учит всем дисциплинам непосредственно, то, по крайней мере, курирует весь ход обучения с первого курса и до выпуска (и даже после выпуска). Это и есть изначально, по-видимому, тьюторная методика обучения – руководитель «Класса...» не только учитель, но и тьютор – управляющий процессом учебы обучаемого.

Если в творческих вузах процесс взаимодействия учителя и ученика носит в основном личностный, персонифицированный характер, то в технических вузах главную роль призваны играть «интеллектуальные информационные системы» (ИИС). Эти системы должны принимать на себя многие (важно – не творческие) функции преподавателя.

Если при индивидуальной работе с обучаемым используется принцип когнитивности, то при работе с группой предлагается, с учетом использования интеллектуальных систем поддержки учебного процесса, проводить развитие методов вариативного управления актуализацией знаний в учебном процессе.

Вариативность (от лат. *variatio* – изменение), исходя из определения, – результат личной инициативы, импровизации, который коллектив принимает, запоминает и закрепляет в дальнейшей практике.

Актуализация – извлечение индивидом усвоенного материала (знаний, умений, навыков, различных эмоциональных состояний, форм представлений мыслей) из потенциального (латентного, скрытого) состояния в актуальное действие.

Под вариативным управлением будем понимать «управление процессом обучения группы, максимально учитывающее их индивидуальные личностно-психологические особенности, способствующие развитию и закреплению творческих наклонностей, импровизации, мотивации и других аспектов обучения, связанных с получением, освоением и использованием знаний для формирования необходимой компетентности с использованием современных возможностей интеллектуальных информационных систем».

Управление предполагает реализацию процесса принятия решения и преподавателем, и обучаемым по выбору технологии изучения, глубины и степени освоения предмета как в отдельности, так и в совокупности курсов, входящих в специальность, в которой обучаемый приобретает компетентность.

Современные технологии управления обучением для создания современных эффективных интеллектуальных информационных систем (программно-методических комплексов) должны обеспечивать следующие функции [1]:

- формирование конечной цели и подцелей обучения;
- выбор путей достижения выбранной цели;
- ориентация на психологические и личностно-индивидуальные особенности обучаемого;
- определение индивидуального плана изучения материала для каждого отдельного обучаемого или сформированной группы;
- контроль за ходом обучения на промежуточных этапах.

Управление процессом осуществляется одним из базовых методов: индуктивным, дедуктивным или абдуктивным.

В соответствии с общей теорией систем в иерархических многоуровневых системах управления выделяются два встречных потока: поток информации и поток управляющих воздействий [2]. В зависимости от связей и первичности потоков выделяются два алгоритма управления: дедуктивный и индуктивный.

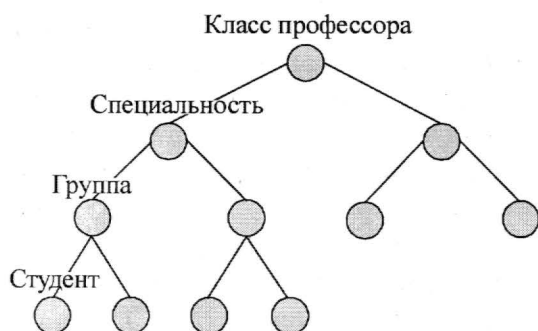


Рис.1. Схема обмена информацией о ходе обучения при абдуктивном методе управления учебным процессом

Основной недостаток данных методов управления – невозможность обеспечивать необходимое решение (изменение методов достижения главной цели) на промежуточных этапах процесса обучения, что является основной задачей при вариативном управлении процессом обучения группы. Данный недостаток в меньшей мере проявляется при использовании абдуктивного метода вариативного управления обучением (рис.1).

В рамках данного метода обучаемому позволено начинать процесс обучения с этапа, наиболее подходящего данному обучаемому в соответствии с его индивидуальными особенностями, уровнем подготовки и осведомленности по данному направлению. Обучаемый сам вправе выбрать технологию обучения по дисциплине: «от общего к частному», «от частного к общему» или постоянное чередование данных методик в рамках изучения всей дисциплины.

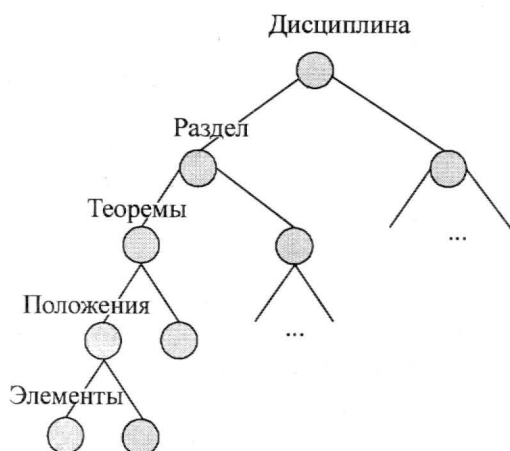


Рис.2. Схема организации учебного процесса системы типа «Класс профессора...»

Поставлена задача реализации управления обучением, при котором преподаватель для конкретного обучаемого в группе может сформировать индивидуальный порядок изучения конкретной дисциплины, задать переход к следующему занятию в зависимости от результатов обучения на предыдущем этапе.

Иерархичность системы обучения рассматривается в двух аспектах: количественном и качественном. Схема количественной структуры представлена на рис.2. Образуется организационно-информационная система «Класс профессора...».

В количественном аспекте содержание дисциплины, образующее контент (представляемая информация) информационных систем представляется в виде иерархической структуры (рис.3).

С математической точки зрения содержание информации в такой иерархии представляется естественным ограниченным языком, образованном грамматикой G

$$G = (V, \Sigma, P, \sigma),$$

где V – полный словарь (или алфавит); $\Sigma \subseteq V$ (Σ – множество терминальных символов); P – конечное множество упорядоченных пар вида (u, v) (где $u \in (V - \Sigma)^*$ и $v \in V^*$); σ – начальный символ.

Создание и представление контента в виде языка, образованного грамматикой, позволяет не только структурировать знания для обеспечения их эффективной актуализации, но и способствует реализации вариативного управления в рамках

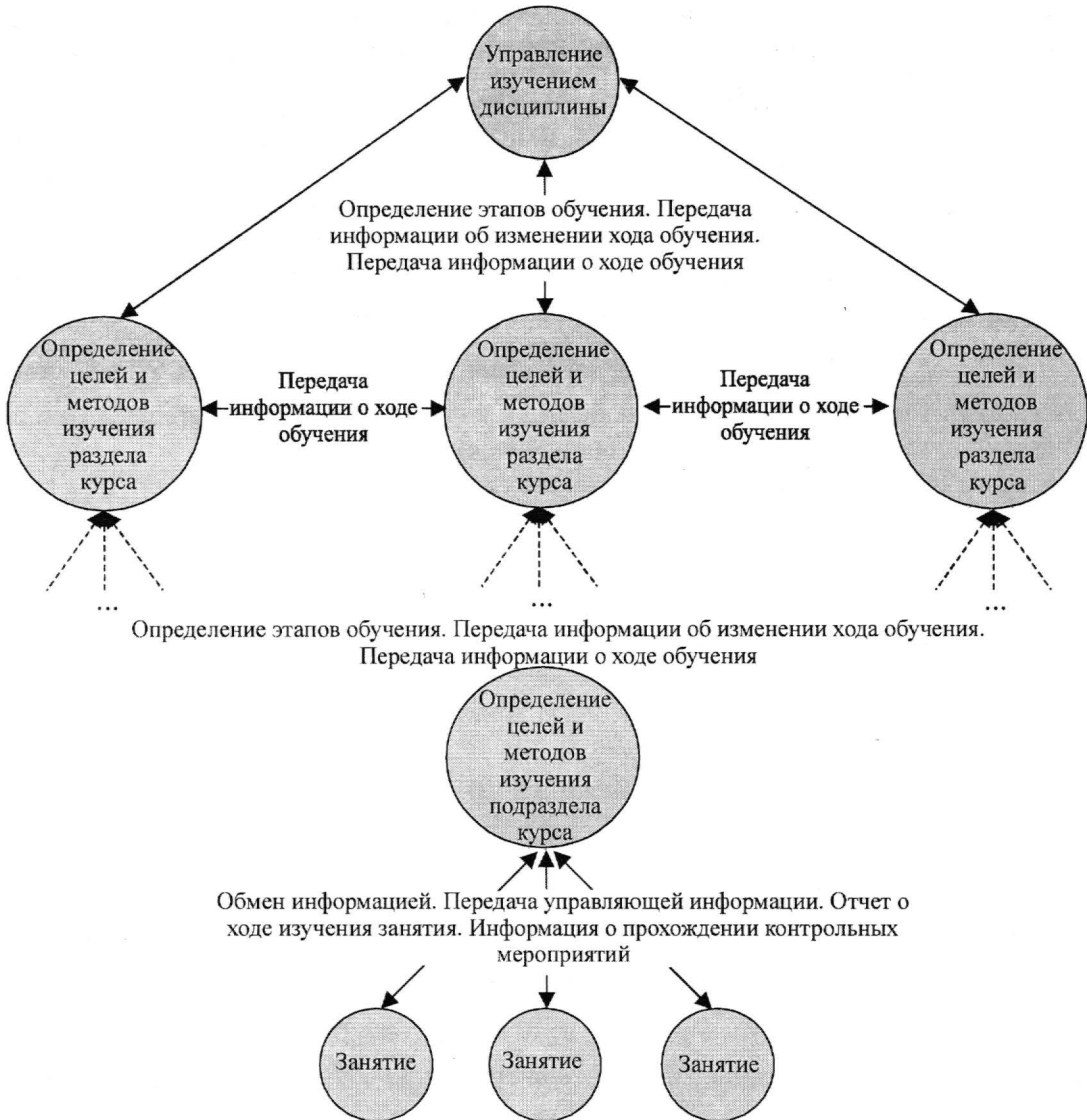


Рис.3. Структура дисциплины в информационной системе

единой интеллектуальной информационной системы. Представление контента ИИС по нескольким связанным дисциплинам осуществляется путем построения семантической пирамиды.

В процессе вариативного управления играет роль не только построение грамматики языка дисциплины, но и характер видов учебной деятельности: изучение теоретического материала, практические, лабораторные, контрольные работы, которые образуют этапы обучения, связанные между собой определенной последовательностью.

Дисциплину можно представить тройкой

$$D^U = \langle V^U, R^U, U^U \rangle,$$

где V^U – множество этапов обучения; R^U – матрица смежности дисциплины; U^U – алгоритм формирования индивидуальной траектории обучения по дисциплине [3].

Матрица смежности R показывает связь между этапами обучения дисциплины и возможные пути перехода от этапа i к этапу j .

Алгоритм формирования индивидуальной траектории обучения заключается в анализе текущего состояния обучения, результатов обучения студента и выборе дальнейшего пути.

Пусть $V^U = \{v_1^U, v_2^U, \dots, v_{11}^U\}$, где v_i^U – элементарный этап обучения по дисциплине. Элементарным этапом обучения является, например, теоретический блок, в результате обучения по которому оценка не выставляется, или контрольный блок, состоящий из одного тестового задания, в зависимости от правильности или неправильности ответа, на который и будет передаваться управление на выполнение следующего элементарного этапа.

Определим следующие значения для элементов матрицы смежности: 0 – переход запрещен; 1 – переход в случае верного ответа на вопрос контрольного блока v_i^U ; 2 – переход в случае неправильного ответа на вопрос контрольного блока v_i^U ; 3 – переход вне зависимости от правильности или неправильности ответа на вопрос контрольного блока или в случае перехода из блока теоретических сведений.

Приведем пример матрицы смежности дисциплины:

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Для демонстрации алгоритма изучения дисциплины используем представление матрицы смежности в виде взвешенного графа $\Gamma = (V, R)$, где V – множество вершин;

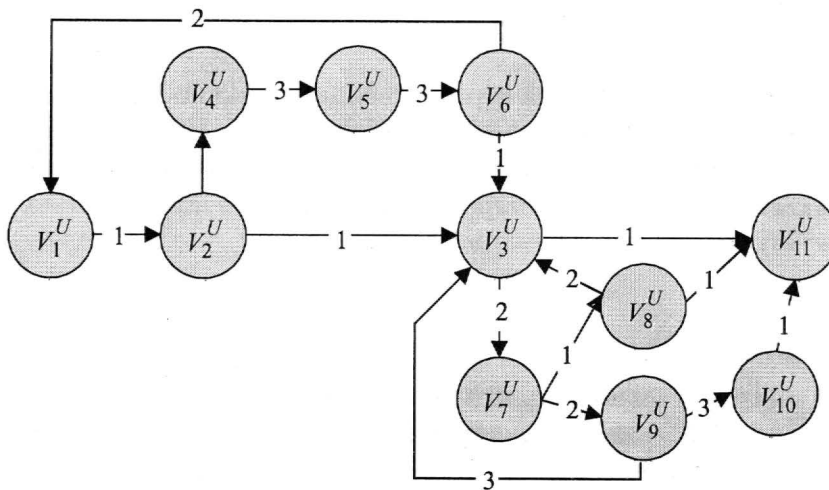


Рис.4. Пример структуры изучения курса

R – множество взвешенных ребер (рис.4) [4]. Вершины графа $V_1^U, V_4^U, V_5^U, V_9^U$ соответствуют теоретическим этапам обучения. Вершины графа $V_2^U, V_3^U, V_6^U, V_7^U, V_8^U$ и V_{10}^U – блоки контрольных заданий. V_{11}^U – заключительный этап, на котором ставится итоговая оценка по изучению дисциплины.

Таким образом, в зависимости от уровня знаний студента и заложенной в матрице смежности структуры курса осуществляется с учетом вариативности индивидуальное управление обучением конкретной дисциплине для каждого члена группы.

Термин «вариативность» подразумевает участие в процессе обучения самого обучаемого, его личностных особенностей и качеств. Поэтому управление технологией обучения при использовании ИИС обеспечивается наличием следующих функций:

- обратная связь от обучаемого к преподавателю;
- возможность хранения в обучающем комплексе информации о ходе обучения (промежуточных этапах);
- возможность корректировки процесса обучения преподавателем на основе полученных данных о ходе обучения;
- «гибкость» системы к действиям обучаемого.

Реализация требуемых функций и возможностей ИИС осуществляется по схеме взаимодействия «преподаватель–обучаемый» в процессе обучения (рис.5).

Использование возможностей информирования преподавателя о ходе обучения и проблемах, возникших у обучаемого, в совокупности с наличием обратной связи между обучаемым и преподавателем дают возможность преподавателю оперативно вводить изменения в процесс обучения.

Базовой составной частью ИИС, способствующей вариативному управлению актуализацией знаний, является интеллектуальный тренажер, позволяющий проводить:

- планирование обучения (несколько комплексных интеллектуальных тренажеров);
- контроль учебного процесса;
- отчетность по учебному процессу;
- ведение учебной дисциплины (тьютором/администратором);
- промежуточный и итоговый контроль знаний.

Одним из требований, предъявляемым современным интеллектуальным тренажерам, является их способность самостоятельно решать задачи из предметной области, по которой ведется обучение. При этом класс задач не должен ограничиваться конкретным, заранее заготовленным набором условий задач и их решений. Решение задачи система должна находить самостоятельно в результате обработки базы знаний. Условия решаемых задач могут быть либо заготовлены в составе учебного материала по изучаемому предмету, либо сгенерированы системой, либо пользователем. Спецификой интеллектуального тренажера является его способность не только решать задачи, но и обучать пользователя решению этих задач и осуществлять контроль правильности решения задачи.

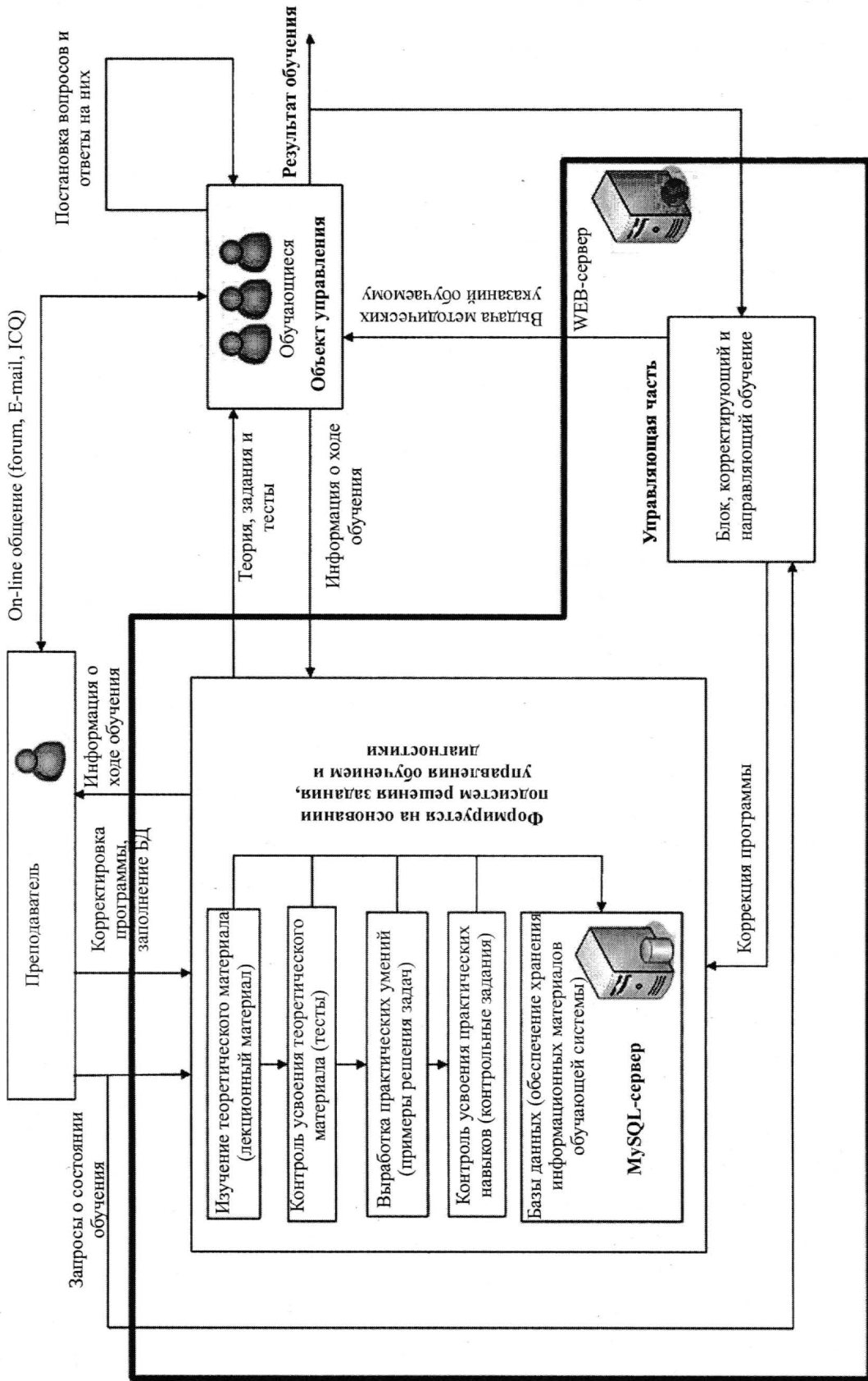


Рис. 5. Схема взаимодействия «преподаватель–обучаемый»

Таким образом, помимо знаний о предметной области интеллектуальный тренажер должен содержать механизмы их переработки, которые подразделены на группы в соответствии со спецификой реализуемых с их помощью режимов функционирования системы:

- решение задач по их постановкам;
- объяснение полученного решения;
- ознакомление пользователя с предметной областью.

Реализация данных технологий в программно-методическом комплексе интеллектуальной информационной поддержки вариативного управления актуализацией знаний в учебном процессе позволяет передать часть функций преподавателя комплексу, что способствует организации личностно-ориентированного и тьюторного обучения.

Использование абдуктивного метода управления обучением с применением адаптивного процесса обучения позволяет максимально учитывать психологические особенности обучаемого.

Литература

1. **Гриненко Н.С.** Управление учебным процессом в системах обучения на основе e-learning технологий // Тез. докл. Междунар. научн. конф. «Современные проблемы прикладной математики и математического моделирования». – Воронеж, 2005.
2. **Месарович М., Мако Д., Такахара И.** Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Мир, 1973. – 344 с.
3. **Игнатова И.Г.** Корпоративные электронные информационные среды поддержки научно-образовательной деятельности на основе процессно-ролевого подхода: Дис. ... д-ра техн. наук. – М. 2005. – 371 с.
4. **Бурков В.Н., Заложнев А.Ю., Новиков Д.А.** Теория графов в управлении организационными системами. – М.: СИНТЕГ, 2001. – 124 с.
5. Форум по проблемам компьютерного образования (<http://ifets.ieee.org/russian/>).

Статья поступила
13 апреля 2007 г.

Лисов Олег Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры информатики и программного обеспечения вычислительных систем (ИПОВС) МИЭТ. *Область научных интересов:* общая теория систем, системный анализ, многокритериальная оптимизация систем, информационные системы гомеостаз, синергетическая теория экономических систем, e-learning системы.

Гриненко Никита Сергеевич – аспирант кафедры ИПОВС. *Область научных интересов:* общая теория систем, системный анализ, информационные системы, автоматизированные обучающие системы, e-learning системы.

Ко Ко Аунг – аспирант кафедры ИПОВС. *Область научных интересов:* системный анализ, e-learning системы обучения.

Программный комплекс формирования заданий при изучении методов технической диагностики

Чжо Чжо Кхаин

**Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)**

Обсуждены вопросы построения автоматизированной обучающей системы (АОС) по диагностике с использованием e-learning технологий. Предложены способы генерации контрольных заданий для создаваемой АОС. Предметной областью АОС являются методы технической диагностики.

Техническая диагностика – отрасль научно-технических знаний, сущность которой составляют [1] теория, методы и средства обнаружения и поиска дефектов объектов технической природы.

Несмотря на важность роли диагностического аспекта в обеспечении и поддержании надежности сложных объектов, внедрение в практику результатов технической диагностики недостаточно. Одной из причин такого положения можно считать отсутствие системы подготовки специалистов по технической диагностике в высших и средних учебных заведениях [2].

Диагностический аспект обеспечения и поддержания надежности состоит в рассмотрении и реализации совокупности мероприятий по своевременному обнаружению и поиску дефектов с целью их последующего устранения (или исключения недопустимого влияния) и тем самым восстановления работоспособного состояния объекта [1]. Специалистов в этой области не так много, поэтому предметная область автоматизированной обучающей системы (АОС), связанная с обучением методам технической диагностики, представляется весьма актуальной.

На сегодняшний день во всем мире развивается система заочного и вечернего образования [3]. Для таких студентов предлагается АОС, которая давала бы возможность студентам изучать теоретический материал и закреплять его на практике путем решения задач и тестов.

Разрабатываемая система может использоваться как в очной, так и в заочной форме обучения по дистанционной технологии. АОС содержит теоретический блок, который предлагается студентам для изучения. После завершения изучения теоретической части студент должен выполнить тестовые задания. Тестовые задания в АОС генерируются автоматически.

Актуальность автоматической генерации контрольных заданий в АОС обусловлена следующими причинами.

Если АОС используется как вспомогательное средство, призванное улучшить качество обучения в рамках очного учебного процесса, то автоматическая генерация контрольных заданий гарантирует достаточно большое их количество, чтобы избежать повторяемости и освободить преподавателя от трудоемкой работы по формированию заданий.

Если АОС используется в рамках дистанционного образования, то количество заданий может быть несколько меньше, но автоматическая генерация заданий повышает степень автоматизированности и позволяет выдерживать определенную методологию обучения – индивидуализацию.

К достоинствам автоматической генерации заданий можно отнести следующие:

- типовые задания с предопределенными ответами рано или поздно становятся известны студентам и их приходится обновлять, в случае автоматической генерации этой проблемы нет;

- индивидуальные задания, генерируемые в автоматическом режиме, предполагают невозможность воспользоваться чужим решением.

Недостатком автоматической генерации заданий является то, что преподаватель должен сам с точностью до значений проверять сгенерированные задания, а это требует от него дополнительных усилий и времени. Но этот недостаток в разрабатываемой АОС устранен, так как в ней предусмотрено наличие автоматического «решателя», который выполняет задачу параллельно со студентом и может контролировать как конечный результат, так и процесс его получения в пошаговом режиме.

Предметной областью разрабатываемой АОС является диагностика отказов комбинационных схем.

Существуют два принципиально разных способа борьбы с неисправностями компонентов электрических схем: используя избыточность, добиваются парирования неисправностей; диагностическими средствами осуществляют обнаружение и идентификацию неисправностей.

Парирование неисправностей не входит в круг наших интересов на данном этапе, поэтому остановимся на диагностике и обнаружении неисправностей. Воспользуемся для достижения поставленной цели d -алгоритмом Рота [4].

В [4] введены следующие понятия. Вырожденным покрытием называется видоизмененная таблица истинности вентиля, представленная в комплексной форме.

Каждая строка вырожденного покрытия называется кубом и определяет причинную связь между входными и выходными сигналами вентиля. Принцип использования d -куба состоит в том, что один вход вентиля становится «управляющим», т.е. определяющим результаты на выходе этого вентиля. Вырожденные покрытия различных вентиля показаны на рис.1.

Методика использования d -куба позволяет определить неисправные вентили в комбинационных схемах.

Цель разрабатываемой АОС – обучить студентов использованию методики d -кубов для идентификации неисправностей.

Контрольные задания для АОС представляют собой электрическую схему, для которой требуется вычислить выходной сигнал. После этого в предлагаемую схему вводится неисправность и обучаемый должен вычислить значения выходных сигналов в контрольных точках и определить неисправный элемент.

Для автоматической генерации схемы возможны два подхода: генерация древовидной структуры и послойная генерация схемы [5, 6].

Древовидная структура формирования схемы имеет следующие недостатки:

- она не позволяет сформировать схему, в которой один и тот же вход или выход служит входом для нескольких вентиля;

- она имеет достаточно жесткую конфигурацию и не позволяет использовать входы схемы в «чужом» слое;

- генерация схемы происходит «с обратной» стороны, т.е. не с той, с которой впоследствии происходит ее обработка.

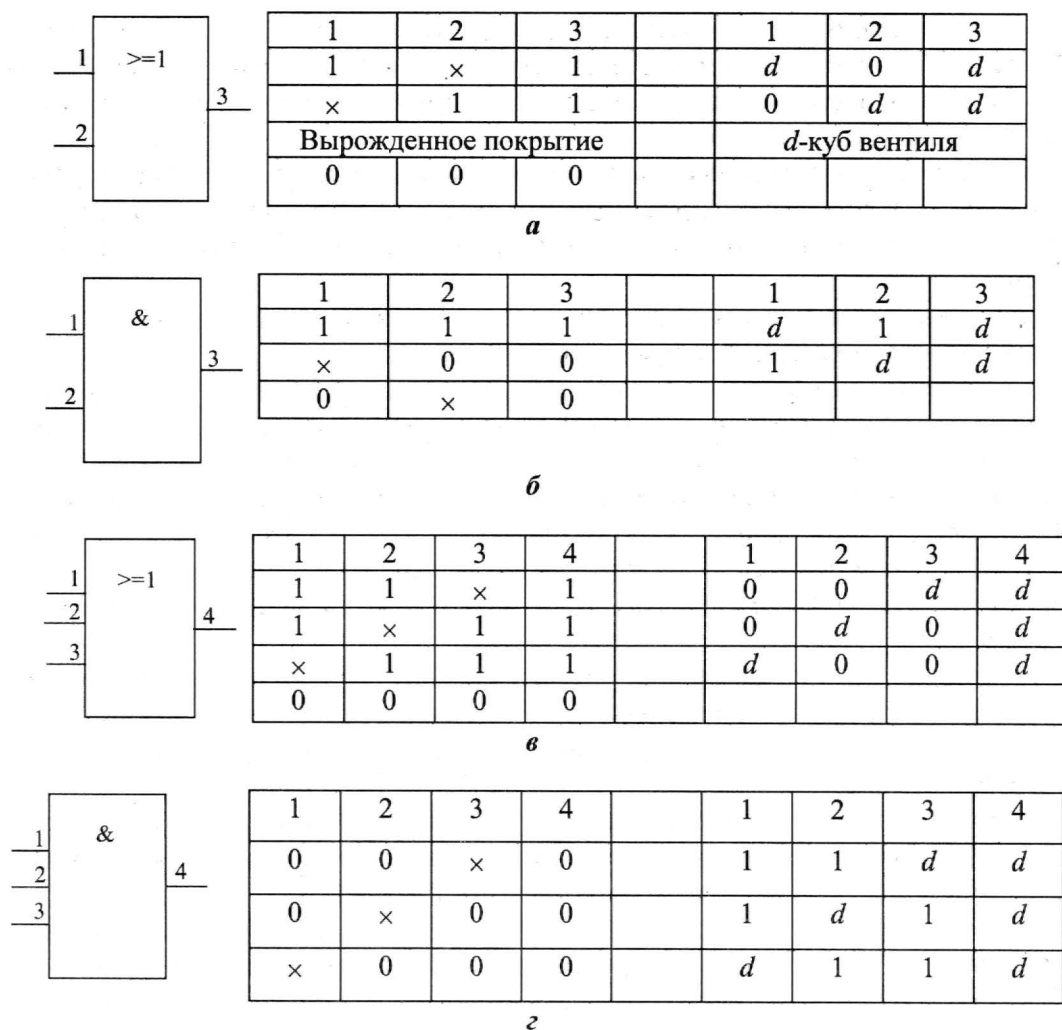


Рис.1. Вырожденные покрытия вентилей: а – вентиль «ИЛИ» двухвходовый; б – вентиль «И» двухвходовый; в – вентиль «ИЛИ» трехвходовый; г – вентиль «И» трехвходовый

Послойная генерация схемы – это другой подход, имеющий алгоритмическую основу, отличающуюся от древовидной структуры. Схема алгоритма генератора заданий показана на рис.2.

Задается количество входов в первом слое схемы (случайным образом). Далее случайным образом генерируются вентили из определенного заранее набора. Входы схемы служат входами вентиля первого слоя схемы. Слой вентиля генерируется до тех пор, пока не останется входов меньше, чем в очередном сгенерированном вентиле. После этого можно использовать один из трех способов.

Первый способ состоит в том, что оставшиеся свободными входы данного слоя переходят в качестве входов в следующий слой. Эти действия происходят до тех пор, пока не будет сформирован последний слой, содержащий один вентиль с одним выходом.

Второй способ – соединение одного (или нескольких) из уже задействованных входов с входом вентиля, генерируемого в данный момент.

Третий способ – генерирование вентиля до тех пор, пока количество входов в вентиле не станет меньше или будет равно количеству свободных входов слоя. Если входов меньше, действия повторяются, если равно, слой считается сгенерированным и происходит переход к генерации следующего слоя, входами для которого являются выходы данного слоя.

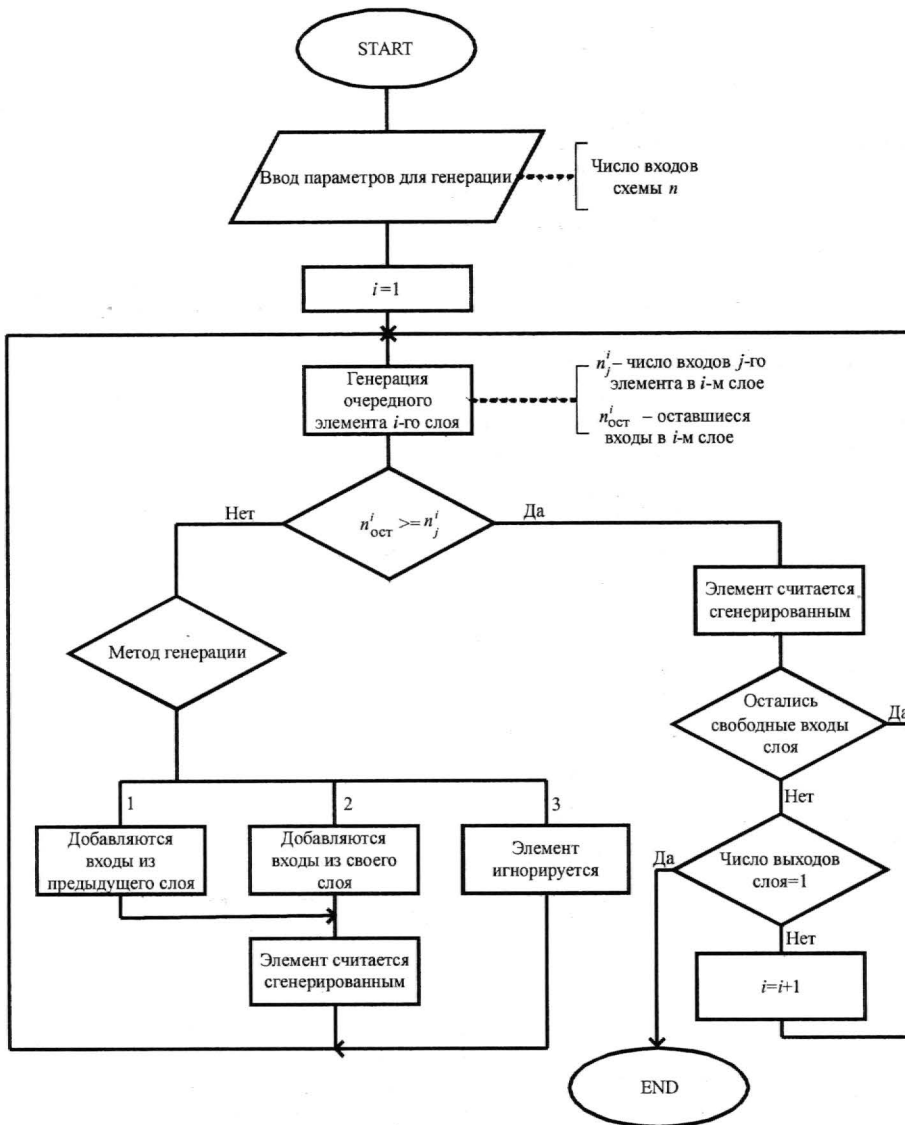


Рис.2. Схема алгоритма работы генератора схемы

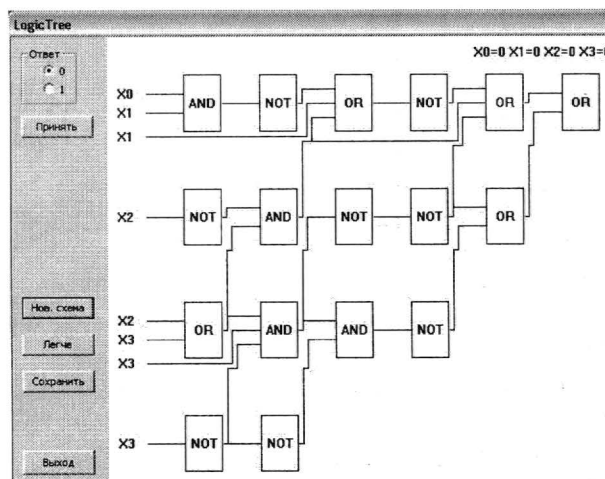


Рис.3. Пример сгенерированной схемы

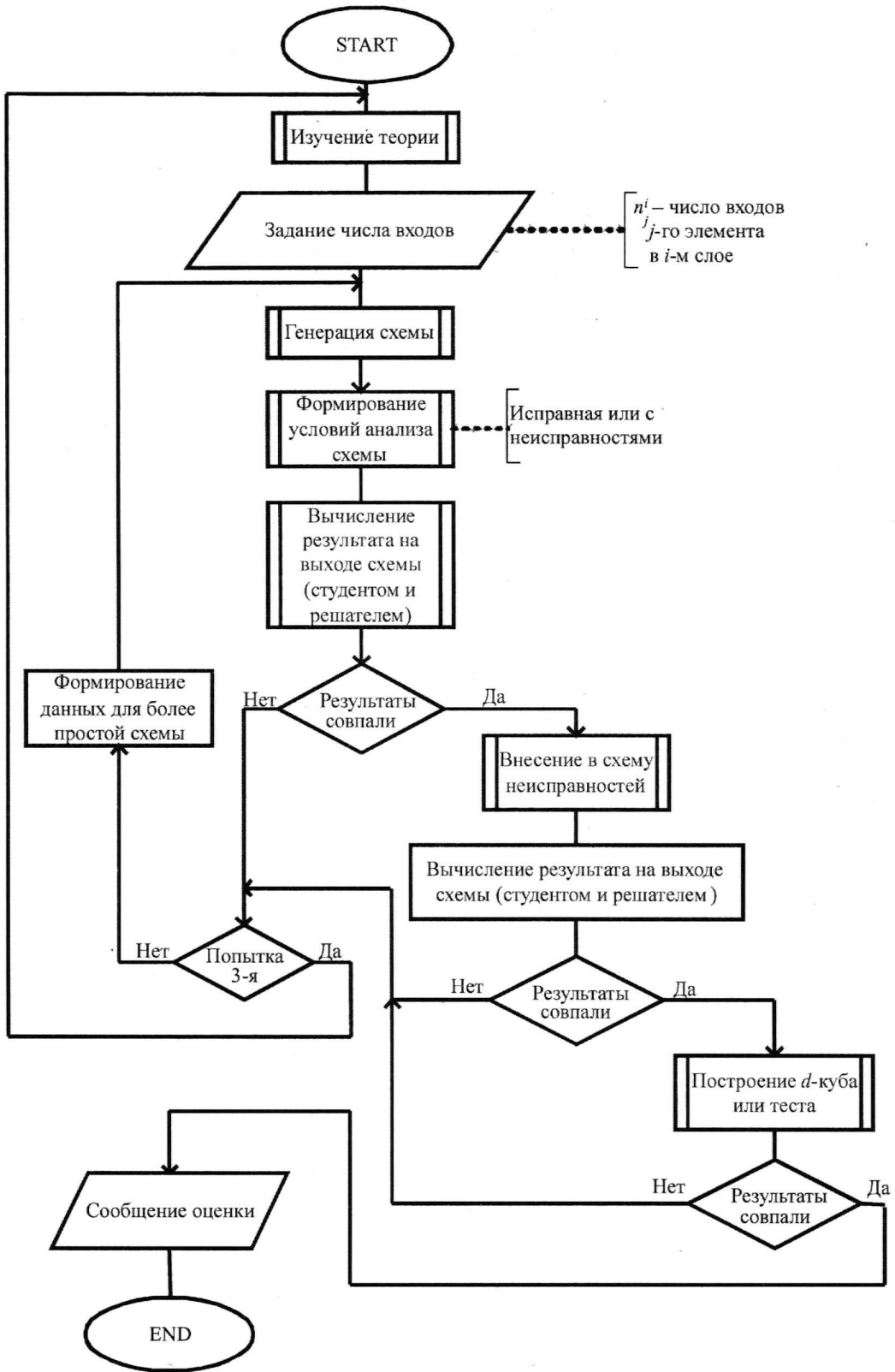


Рис.4. Схема алгоритма работы АОС

При послойной генерации порядок анализа схемы совпадает с порядком ее генерации, т.е. ее анализ происходит последовательно от входов к выходу. На рис.3 показан пример сгенерированной схемы.

Одной из задач, связанных с предметной областью, является обучение студентов находить неисправности в электронных схемах и строить тестовые последовательности для них. Для этого нужно иметь возможность в сгенерированную схему внести неисправность в процессе работы программы (также случайным образом). Эти действия производит функция-эмулятор ошибки, которая в зависимости от случайным образом выбранного параметра (0/1) будет создавать одну из ошибок «константный 0» или «константная 1» на выбранном вентиле.

После того как эмулирована ошибка, обучаемому предлагается снова определить значение на выходе схемы (в том числе и в пошаговом режиме). Если он справился с этой задачей, можно переходить к формированию им тестовой последовательности или построению *d*-куба неисправности.

Разрабатываемая АОС имеет блок настройки на индивидуальные особенности студента. Если студент не справляется с первоначально предложенным заданием, ему предлагается менее сложное задание. Если и это задание оказалось слишком сложным, студенту предлагается еще раз ознакомиться с теоретической частью. Схема алгоритма работы АОС показана на рис.4.

Разработанные алгоритмы работы АОС и автоматической генерации тестовых заданий дают возможность студенту освоить базовые средства технической диагностики, лежащие в основе многих современных методик, применяемых в этой области.

Литература

1. *Пархоменко П.П.* Диагностическое обеспечение и надежность технических объектов // Надежность. – 2002. – № 1. – С. 9–14.
2. *Яблонский С.В., Чегис И.А.* О тестах для электрических схем // Успехи математических наук. – 1955. – Вып. 4(66), № 10. – С. 182–184.
3. *Игнатова И.Г., Соколова Н.Ю.* Информационные и коммуникационные технологии в образовании // Информатика и образование. – 2003. – № 3. – С. 52–61.
4. *Чжэн Г., Мэннинг Е., Метц Г.* Диагностика отказов цифровых вычислительных систем. – М.: Мир, 1972. – 232 с.
5. *Чжо Чжо Кхаин* Интеллектуальная система поддержки процесса обучения по дисциплине «Диагностика сложных систем»-2006 // Тез. докл. 13-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов (Зеленоград, 19–21 апреля 2006 г.). – 2006. – С. 223.
6. *Чжо Чжо Кхаин* Автоматическая генерация тестов для автоматизированной обучающей системы // Системный анализ и информационно-управляющие системы: Сб. науч. тр. / Под. ред. *В.А.Бархоткина*. – М., 2006.

Статья поступила
2 мая 2007 г.

Чжо Чжо Кхаин – аспирант кафедры информатики и программного обеспечения вычислительных систем МИЭТ. *Область научных интересов:* техническая диагностика и электронное образование, современные технологии и языки программирования.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 536.63

Теплоемкость твердого теллурида висмута

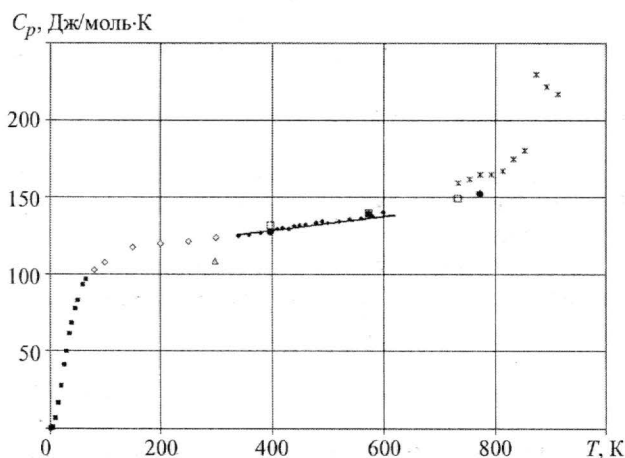
А.С.Пашинкин, А.С.Малкова, М.С.Михайлова

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Теллурид висмута Bi_2Te_3 обладает полупроводниковыми свойствами и совместно с селенидом висмута в виде твердого раствора состава $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,7}\text{Se}_{0,3}$ используется в приборах термоэлектрического охлаждения [1]. Теплоемкость Bi_2Te_3 при низких температурах исследовалась в работах [2] (в интервале 80–300 К), [3, 4] (1,37–64 К и 4–90 К), [5] (1,4–90 К), [6] (93–453 К). Однако, низкотемпературная теплоемкость в работах [3–5] представлена в графическом виде, данные [6], очевидно, ошибочны.

В работе [7] исследована теплоемкость Bi_2Te_3 в интервале 733–923 К (данные представлены графически). За десять градусов до температуры плавления наблюдается скачок теплоемкости, что авторы объясняют структурными особенностями Bi_2Te_3 . Теплоемкость в интервале 373–773 К измерена в [8]. В работе [9] тот же автор привел исправленную зависимость теплоемкости Bi_2Te_3 от температуры. Зависимость $C_p = f(T)$ по данным [9] приведена в табл.1. В [10] исследовали теплоемкость Bi_2Te_3 в интервале 298–773 К. Данные также приведены в табл.1 и на рисунке. Как видно из рисунка, в области 300–600 К данные [9, 10] совпадают, а в области, близкой к температуре плавления 859 К [11], несколько расходятся.

В настоящей работе исследована теплоемкость в интервале 360–600 К. Исследования проводились на приборе ДСМ-2М [12]. Выше температуры 620 К наблюдалось изменение веса образца, что связано с испарением соединения. Подобное поведение отмечалось и в работе [7]. Полученные экспериментальные данные приведены в табл.2. Температурная зависимость дана в виде двухчленного уравнения $C_p = a + bT$. При расчете уравнения $C_p(T)$ использовались полученные данные и C_{p298} [10]. Термодинамические функции приведены в табл.3.



Температурная зависимость теплоемкости твердого теллурида висмута: \diamond – [2]; \blacksquare – [3, 4]; \triangle – [6]; \ast – [7]; \bullet – [9]; \square – [10]; \cdot эксперимент; — расчет

Таблица 1

Температурная зависимость
теплоемкости Bi_2Te_3 ($C_p = a + bT$)

a	$b \cdot 10^2$	Температурный интервал, К	Литературный источник
100,5	6,7	373–773	[9]
112,7	4,7	298, 398–773	[10]
139,3	1,75	733–923	[7]
110,1	4,6	340–620	Наши рекомендации

Таблица 2

Экспериментальные значения теплоемкости Bi_2Te_3
(Дж/(моль·К))

T , К	C_p , Дж/(моль·К)	T , К	C_p , Дж/(моль·К)	T , К	C_p , Дж/(моль·К)
340	124,8	440	131,1	540	135,6
360	125,4	460	132,0	560	136,2
380	126,6	480	132,9	580	137,5
400	128,5	500	133,1	600	139,7
420	129,6	520	134,0	620	142,0

Таблица 3

Термодинамические функции теллурида висмута

T , К	C_p , Дж/(моль·К)	$H_T - H_{298}$, Дж/моль	S_T , Дж/(моль·К)	Φ_T^{XX} , Дж/(моль·К)
298,15	123,9	–	260,7	260,7
400	128,5	12868	297,8	265,6
500	133,1	25948	327,0	275,1
600	139,7	39488	351,6	285,8
700	142,3	53488	373,2	296,8

При расчете термодинамических функций Bi_2Te_3 стандартная энтропия взята из данных [4], а $C_{p, 298}$ из [10].

Литература

1. Гольцман Б.Н., Кудинов В.А., Смирнов И.А. Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi_2Te_3 . – М.: Наука, 1972. – 320 с.
2. Гултыяев И.В., Петров А.В. Теплоемкость некоторых полупроводников // ФТТ. – 1959. – Т. 1, № 3. – С. 368–372.
3. Ицкевич Е.С. Теплоемкость теллурида висмута между 1,4–65 К Энтальпия и энтропия Bi_2Te_3 при 298,15 К // ЖЭТФ. – 1960. – Т. 38, № 2. – С. 351–358.
4. Ицкевич Е.С. Теплоемкость теллурида висмута между 1,4–65 К. Энтальпия и энтропия Bi_2Te_3 при 298,15 К // ЖФХ. – 1961. – Т. 35. – С. 1813–1815.
5. Shoemaker G.E., Rayne J.A., Ure R.W. Specific Heat of *n*- and *p*-Type Bi_2Te_3 from 1,4 to 90 K // Phys. Rev. – 1969. – Vol. 185, № 3. – P. 1046–1056.
6. Wohlrab M. Die spezifische Wärme von Bi_2Te_3 , CdTe, PbTe und SnTe // Ann.Phys. – 1966. – Bd 17, N 1-2. – P. 89–90.
7. Howlett W., Misra S., Bever M.B. On the Thermodynamic Properties of the compounds Sb_2Se_3 , Bi_2Se_3 , Sb_2Te_3 and Bi_2Te_3 trans // AIME. – 1964. – Vol. 230. – P. 1367.
8. Bolling G.F. Addendum to some Thermal Data for Bi_2Te_3 // J. Chem. Phys. – 1960. – Vol. 33, № 1. – P. 305–306.
9. Bolling G.F. Erratum: Addendum to some Thermal Data for Bi_2Te_3 // J. Chem. Phys. – 1962. – Vol. 36. – P. 1085–1086.
10. Мелех Б.Т., Семенович С.А. Теплоемкость теллурида и селенида висмута в интервале температур 773–398 и 298 К // Изв. АН СССР Неорганические материалы. – 1967. – Т. 3, № 11. – С. 1984–1987.
11. Термические константы веществ: Справочник / Под ред. В.П.Глушко. – Вып. III. – М.: ВИНТИ, 1968. – 222 с.
12. Малкова А.С., Жаров В.В., Шмойлова Г.И., Пашилкин А.С. Теплоемкость теллуридов цинка и кадмия в интервале 360–760 К // ЖФХ. – 1989. – Т. 63, № 1. – С. 41–43.

Поступило 19 апреля 2007 г.

Пашилкин Андрей Сергеевич – доктор химических наук, профессор кафедры материаловедения и физической химии МИЭТ. *Область научных интересов:* термодинамика процессов испарения, исследование и анализ теплоемкости полупроводниковых соединений.

Малкова Антонина Семеновна – кандидат химических наук, доцент кафедры материаловедения и физической химии МИЭТ. *Область научных интересов:* термодинамика процессов испарения, исследование теплоемкости полупроводниковых соединений.

Михайлова Мария Сергеевна – кандидат химических наук, доцент кафедры материаловедения и физической химии МИЭТ. *Область научных интересов:* исследование теплоемкости полупроводниковых соединений, электрофизические свойства кремния.

Виртуальная файловая система как метапротокол для организации взаимодействия приложений

Р.Х. Фархшатов

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

При разработке распределенных вычислительных систем, состоящих из большого числа отдельных модулей, многие из которых физически удалены друг от друга и связаны посредством сети, появляется необходимость в создании протоколов обмена данными между этими модулями. Многообразие модулей делает необходимым использование множества разных протоколов, подходящих для каждой отдельной задачи, что усложняет разработку, поддержку и расширение функционала распределенной вычислительной системы. Проблема усугубляется наличием в системе всевозможных беспроводных устройств с ограниченными вычислительными ресурсами, что налагает ограничения на сложность протоколов взаимодействия модулей. Создание единого метапротокола – набора элементарных примитивов для реализации конкретных протоколов – позволяет решить эту проблему.

Реализация указанного метапротокола основывается на представлении информационного пространства системы в виде некоторой совокупности иерархических деревьев, конечные узлы которых являются и данными, и управляющими элементами. Подобное дерево можно назвать виртуальной файловой системой. Управление файлами и директориями осуществляется как локально, так и удаленно независимо от сетевого протокола операциями, такими, как чтение, запись, а также создание и удаление узлов. Передача данных по сети вынесена в отдельный слой, что позволяет работать поверх различных транспортных протоколов.

Каждый модуль системы имеет возможность как предоставлять дерево виртуальной файловой системы другим модулям, так и включать предоставляемые другими модулями файловые системы в локальное дерево. Такой подход увеличивает гибкость системы за счет того, что отдельный модуль зависит не от абсолютной структуры дерева комплекса, но всего лишь от некоторой части глобального дерева, что значительно упрощает модификацию системы. Подобный подход применяется в операционной системе Plan9 (использующей протокол 9p*), разработанной в Bell Labs.

Файлы являются не только хранилищами информации, но и средствами для ее обработки – интерфейсами к программным модулям. Запись данных в определенные файлы можно расценивать как вызов соответствующей файлу функции. Последующим чтением данных оттуда можно получить результат выполнения удаленного метода. Это позволяет в низкоуровневом программном интерфейсе приложений оставить только функции работы с файлами, т.е. вызов удаленного метода будет выглядеть следующим образом.

1. Инициализация метода или создание экземпляра класса представляется операцией открытия файла: `fd = open("/system/module-1/some_method")`

2. Вызовом метода с аргументами `arg` является запись в открытый файл данных параметра `arg`: `write(fd, arg)`.

3. Последующим чтением из файла данных можно получить результат выполнения `result` метода: `read(fd, result)`.

4. Закрытием файла совершается уничтожение экземпляра объекта: `close(fd)`.

Понятие файл расширено введением «представлений», т.е. возможностью прозрачно для приложения представить содержимое файла в удобном для обработки виде с помощью заданных для файла модулями-фильтрами. Механизм представлений позволяет прозрачным для приложения способом получить доступ к обработанной информации файла, например к распакованному содержимому архива, получить текстовую форму информации, хранящейся в дво-

* <http://cm.bell-labs.com/sys/man/5/INDEX.html>

ичном виде. Поддержка метаданных также может быть осуществлена с помощью механизма представлений. Размер, время создания, время последнего доступа, владелец файла, права доступа являются присутствующими во всех файлах полями метаданных.

Для работы с представлениями существует обязательное поле, содержащее список всех полей файла и их типы. Приложения работают с представлениями как с обычными файлами. Например, файл `dir/file.ext#info` является представлением `info` файла `dir/file.ext`.

С наличием представлений обработка данных в распределенной системе становится более прозрачной для модулей, что упрощает разработку и поддержку системы. Также появляется возможность предоставлять модулям информацию именно в том виде, в котором им требуется ее получить (рисунок), позволяя тем самым расширять функциональность одних модулей, видоизменяя интерфейсы и не затрагивая остальных частей системы.



Работа механизма «представлений»

К преимуществам такого способа взаимодействия модулей можно отнести как удобство и гибкость разработки, отладки и модификации задаче-ориентированных протоколов, так и легкость расширения и поддержки системы. Если сравнивать модель взаимодействия в виде файловых операций в виртуальной файловой системе с известным стандартом CORBA, разработанным для похожих целей (организация распределенных вычислительных систем), то можно выделить следующие общие отличия: система, использующая CORBA, гораздо сложнее в реализации, что затрудняет развертывание ее в том числе и на беспроводных устройствах, обладающих нестандартной архитектурой и ограниченными вычислительными ресурсами; CORBA предоставляет более высокоуровневые средства работы, от которых тем не менее невозможно отказаться в случае необходимости, например при реализации простейших модулей на маломощных вычислительных устройствах, частей сенсорных сетей. Сравнить метапротокол на виртуальной файловой системе с DCOM и EJB не имеет смысла, так как последние не могут быть перенесены на другие платформы или на другие языки программирования. От похожего протокола 9p эта модель отличается наличием представлений, что упрощает масштабирование системы в силу возможности представления данных в зависимости от требований клиентских модулей, а также возможностью управлять способами таких представлений без необходимости модификации системы.

Таким образом, использование виртуальной файловой системы в качестве метапротокола взаимодействия модулей распределенной системы позволяет свободно создавать задаче-ориентированные протоколы в терминах файловых операций (`open`, `close`, `read`, `write`, `create`, `remove`). Это значительно упрощает разработку системы, отладку взаимодействия модулей, абстрагируясь от их физического расположения и архитектуры их аппаратных платформ, а также позволяет расширять функциональность отдельных модулей и системы в целом без необходимости модификации остальных частей системы, логически не затрагиваемых изменениями. Лаконичность и гибкость протокола позволяет реализовывать его на широком спектре аппаратных решений, в том числе и на беспроводных устройствах.

Поступило
24 мая 2007 г.

Фархиатов Рамиль Халимович – аспирант кафедры информатики и программного обеспечения вычислительных систем МИЭТ. *Область научных интересов:* интегрированные вычислительные сети для беспроводных устройств, динамические языки программирования, метапрограммирование.

Исследование нелинейности вольт-амперных характеристик тонких пленок меди и никеля импульсным методом

Д.Г.Громов, Г.П.Жигальский, А.В.Карев, И.А.Карев, И.С.Чулков

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Широко известно эффективное использование неразрушающих методов контроля качества различных проводящих и резистивных элементов и изделий радиоэлектроники по нелинейности их ВАХ [1]. Наиболее чувствительным и информативным к наличию скрытых дефектов является метод, основанный на измерении постоянной составляющей сигнала-отклика, возникающей при импульсном периодическом электрическом воздействии [1–4]. Однако работы, связанные с изучением нелинейных эффектов при импульсном электрическом воздействии у образцов пленок меди и никеля пониженной размерности, отсутствуют.

Цель настоящей работы – выяснение зависимости напряжения постоянной составляющей сигналов-откликов образцов сплошных наноразмерных проводящих слоев меди и никеля от параметров импульсного периодического электрического воздействия при предельно допустимых плотностях тока, что, в свою очередь, необходимо для оценки диагностических возможностей соответствующих неразрушающих методов контроля качества проводящих слоев интегральных схем.

Исследовались образцы пленок меди Cu и никеля Ni толщиной 25 нм, шириной 0,3 мм и длиной 6 мм со средним отводом шириной 0,3 мм, изготовленные в виде полумостовой схемы. Сопротивление пленок находилось в диапазоне от 40 до 730 Ом. Температурный коэффициент сопротивления (ТКС) образцов близок к 10^{-3} K^{-1} , что указывает на металлический характер их проводимости [5]. В качестве подложки использовался ситалл. Проводящие слои Cu и Ni и контакты к ним толщиной около 0,7 мкм осаждали через маски в установке магнетронного ионно-плазменного распыления УРМ 3.279.026. Скорость нанесения пленки меди составляла 0,27 нм/с, никеля – 0,24 нм/с при давлении рабочего газа (Ar) $6 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. После осаждения проводящих слоев проводники на основе меди покрывались пассивирующей пленкой Al_2O_3 , которая наносилась электронно-лучевым испарением корундовой мишени.

Нелинейные эффекты в проводниках исследовались методом измерения напряжения постоянной составляющей U_{CN} сигнала-отклика, возникающей при воздействии на образец периодической последовательностью прямоугольных импульсов электрического тока, не содержащей постоянной составляющей, с амплитудой I_{V1} , длительностью τ_{V1} и со скажностью $Q = 10$ [2, 3].

На рис.1 приведены экспериментальные зависимости напряжения постоянной составляющей U_{CN} для пленок Cu и Ni от длительности τ_{V1} , а на рис.2 – от амплитуды импульсов тока I_{V1} .

Результаты показывают, что напряжение постоянной составляющей U_{CN} пропорционально $\sqrt{\tau_{V1}}$ в диапазоне длительностей 1–128 мкс (см. рис.1) и зависит от тока по закону $U_{CN} \sim I_{V1}^3$ в диапазоне амплитуд импульсов тока 5–300 мА (см. рис.2).

Зависимость U_{CN} от времени свидетельствует о том, что процессы, приводящие к возникновению U_{CN} , являются инерционными.

Амплитуду импульсов тока увеличивали до разрушения образцов, изготовленных на основе пленок меди. Однако не удалось выявить каких-либо значительных отклонений от указанных степенных зависимостей, которые могли бы служить предвестником разрушения проводящего слоя образцов. Поэтому метод контроля, основанный на измерении напряжения постоянной составляющей U_{CN} сигнала-отклика при воздействии на образец периодической последовательностью прямоугольных импульсов тока, не является информативным методом оценки устойчивости слоев к уровню электрических воздействий.

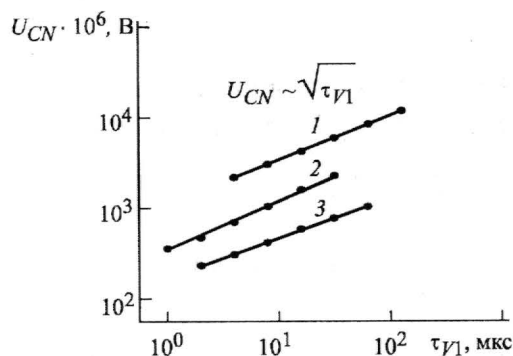


Рис.1. Зависимости напряжения постоянной составляющей U_{CN} сигнала-отклика образцов от длительности τ_{I1} импульсов тока при $Q = 10$ для образцов проводящей структуры на основе пленки: 1 – никеля ($R = 730$ Ом, $I_{I1} = 50$ мА); 2 – меди ($R = 73,7$ Ом, $I_{I1} = 100$ мА); 3 – меди ($R = 41,4$ Ом с защитой Al_2O_3 , $I_{I1} = 200$ мА)

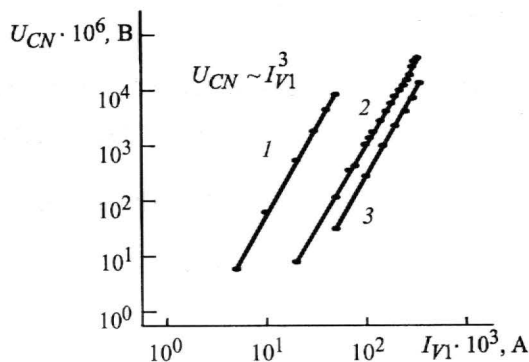


Рис.2. Зависимости напряжения постоянной составляющей U_{CN} сигнала-отклика образцов от амплитуды I_{I1} импульсов тока при $Q = 10$ для образцов проводящей структуры на основе пленки: 1 – никеля ($R = 730$ Ом, $\tau_{I1} = 64$ мкс); 2 – меди ($R = 74,5$ Ом, $\tau_{I1} = 64$ мкс); 3 – меди ($R = 41,4$ Ом с защитой Al_2O_3 , $\tau_{I1} = 32$ мкс)

Итак, причиной возникновения нелинейных эффектов в тонких пленках из Cu и Ni при положительном ТКС являются инерционные процессы; напряжение постоянной составляющей сигнала-отклика пропорционально квадратному корню из длительности импульса и третьей степени амплитуды импульсов тока.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 06-08-00780).

Литература

1. Жигальский Г.П., Карев А.В. Неравновесный фликкер-шум в тонкопленочных резисторах на основе тантала // Радиотехника и электроника. – 1999. – Т. 44, № 2. – С. 220–224.
2. Данилин Н.С. Неразрушающий контроль качества продукции радиоэлектроники. – М.: Изд-во. стандартов, 1976. – 240 с.
3. Карев А.В., Карев И.А. Метод определения уровня нелинейности ВАХ безынерционных проводящих и резистивных структур интегральных схем // Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники. ПЭМ'06. Ч. 1. – ТРТУ, 2006. – С. 149–151.
4. Карев А.В., Карев И.А. Нелинейные эффекты в металлопленочных резисторах и резистивных структурах интегральных схем при импульсном электрическом воздействии // Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники. ПЭМ'06. Ч. 1. – ТРТУ, 2006. – С. 152–154.
5. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. – СПб.: Лань, 2003. – 368 с.

Поступило
13 апреля 2007 г.

Громов Дмитрий Геннадьевич – доктор технических наук, профессор кафедры материалов и процессов твердотельной электроники МИЭТ. *Область научных интересов:* поверхность и тонкие пленки, фазовые равновесия и превращения.

Жигальский Геннадий Павлович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры интегральной электроники и микросистем (ИЭМС) МИЭТ. *Область научных интересов:* поверхность и тонкие металлические пленки, шумы в электронных твердотельных приборах.

Карев Александр Владимирович – старший преподаватель кафедры ИЭМС МИЭТ. *Область научных интересов:* поверхность и тонкие пленки; шумы в электронных твердотельных приборах.

Карев Иван Александрович – аспирант кафедры ИЭМС МИЭТ. *Область научных интересов:* поверхность и тонкие пленки; шумы в электронных твердотельных приборах.

Чулков Игорь Сергеевич – аспирант кафедры ИЭМС МИЭТ. *Область научных интересов:* поверхность и тонкие пленки; фазовые равновесия и превращения.

Экспериментальное исследование затухания радиоволн внутри помещений на частоте 433 МГц

Аунг Мьинт Эй, А.А.Пронин, А.В.Кондратов

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

В последние годы возросло количество сетей, использующих беспроводную связь внутри помещений. Среди них много устройств, работающих на частоте 433 МГц (системы управления, датчики, радиостанции и др). При этом возникает ряд проблем, связанных с наличием препятствий на пути распространения сигналов, а также из-за многолучевого распространения сигналов и большого количества переотражений. Поэтому в помещениях могут возникать так называемые «мертвые» зоны, в которых наблюдаются глубокие замирания сигналов. Так как многие модели распространения сигналов внутри помещений не дают полной картины, то определение таких зон возможно только экспериментальным путем.

Исследование «мертвых» зон или зон с неуверенным приемом проводилось с помощью измерительного стенда. Экспериментально определялись места наилучшего расположения беспроводных точек доступа и беспроводных абонентских станций внутри помещения на частоте 433 МГц.

Технические характеристики приемопередатчиков, используемые в эксперименте:

Полоса частот трансивера, МГц.....	от 400 до 950
Выходная мощность (на частоте 433 МГц), дБм.....	+8
Скорость передачи данных, кбит/с.....	до 64
Ширина спектра сигнала, кГц.....	128

В состав используемого комплекса для измерения входят: тестовый приемник R&S ESCI, приемопередатчики, ноутбук и источники питания. На рис.1 представлена блок-схема измерительного стенда.

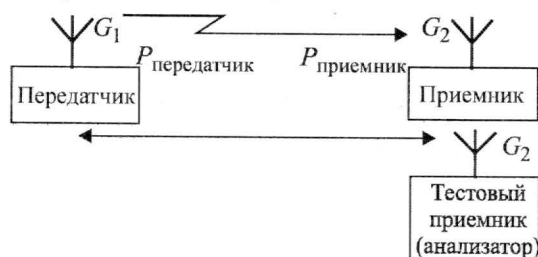


Рис.1. Структурная схема измерительного стенда

Полоса разрешения анализатора спектра должна быть не меньше полосы спектра сигнала. Чтобы не потерять часть мощности сигнала, полоса разрешения выбирается равной 300 кГц.

Модели распространения сигналов внутри зданий. Предложенные к настоящему времени модели распространения сигналов внутри зданий можно разделить на 3 группы.

Статистические модели. Не требуют подробной информации о здании кроме общего опи-

сания его типа: производственное здание, гостиница, больница, торговый центр, здание старой постройки и т.п. [1, 2].

Эмпирические одно- или многолучевые модели. Основаны на анализе одного или нескольких лучей, соединяющих передающую и приемную антенны, для оценки уровня принимаемого сигнала [1], [3, 4].

Лучевые модели. Используется квазиоптическое представление процессов распространения сигналов и учитываются отражения от стен помещения и дифракция на углах [4].

В статистических моделях потери распространения сигнала L_p имеют следующую зависимость от расстояния между антеннами d :

$$L_p = L_{p0}(d_0) + n \cdot 10 \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) \text{ [дБ]}, \quad (1)$$

где показатель степени n определяется типом здания; L_p – потери в тракте передачи; d_0 – расстояние отношения; d – расстояние между приемником и передатчиком; $L_{p0}(d_0) = 20 \lg\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right)$ [дБ].

Такая модель может использоваться в программном пакете и обеспечивать быстрый расчет дальности. При этом определяется только расстояние между антеннами – все другие параметры и константы относятся ко всему зданию в целом и задаются предварительно.

Эмпирические модели (Motley-Keenan [3], Multi-Wall-Model [1]) основаны на добавлении к формуле (1) потерь во всех стенках на пути между приемной и передающей антеннами. В относящейся к этой же группе модели DPM (Dominant Path Model) к основному лучу добавляются дополнительные лучи, проходящие через соседние помещения по отношению к тем, что лежат на главном пути. При этом точный поиск точек отражения сигнала не проводится.

Стекланные перегородки с металлическим каркасом добавляют в зависимости от площади металла и частоты сигнала от 3 до 30 дБ ослабления.

Лучевые модели [4] по возможности максимально полно учитывают информацию о планировке здания. В соответствии с ними определяются все возможные пути попадания сигнала из антенны передатчика в антенну приемника. Для уменьшения связанного с этим времени расчетов предложено несколько способов ускорения вычислительного процесса.

Дифракционные потери сигнала вдоль каждого пути рассчитываются с использованием геометрической теории дифракции, а коэффициенты отражения – с помощью формул Френеля. Возможно также использование эмпирических соотношений, откалиброванных при помощи экспериментальных данных.

Основным недостатком лучевых моделей является их чувствительность к точности исходных данных [3, 4]. В случаях, когда неточно указаны данные о параметрах стен или их местоположения, результаты расчета существенно ухудшаются.

Исследование распространения сигнала внутри помещения. Для эксперимента комната была условно разделена на секторы, согласно схеме на рис.2.

Комната представляет собой лабораторное помещение, в котором располагаются столы, стулья и оборудование для различных измерений. Участок комнаты (А) отгорожен от общего помещения стеклянной перегородкой с металлическим каркасом. Анализатор располагался в точке (Б) на высоте приблизительно 1,7 м. Приемопередатчик помещался в каждый сектор и анализатором измерялась мощность приходящего сигнала. Передатчик в каждом секторе располагался на высоте примерно 1 м. Расстояние между точками 1 м. Уровень мощности устанавливался на максимум и составлял 7,5 дБм.

Результаты эксперимента отражены на рис.3 в виде значений уровня мощности принимаемого сигнала.

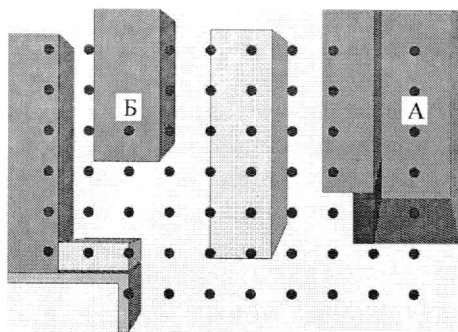


Рис.2. Схема разделения помещения на секторы

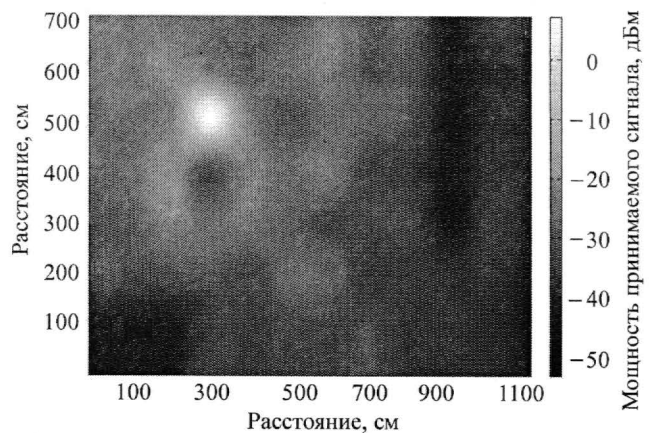


Рис.3. Распределение средней мощности сигнала, принимаемого в помещении

Результаты эксперимента по исследованию распространения сигнала в помещении сводятся к следующему:

- затухание сигнала при распространении вдоль стен во всех случаях больше на 2–3 дБ, чем затухание при распространении радиосигнала вдали от стен;
- при наличии препятствий в виде стеклянных перегородок с металлическим каркасом наблюдалось дополнительное затухание около 10 дБ;
- проведя сравнение эмпирических однолучевых моделей, можно сказать, что для эксперимента наиболее подходящей является эмпирическая модель, так как она наиболее точно учитывает влияние условий распространения, присущих данному эксперименту.

Эксперимент показал устойчивую работу приемопередатчиков в помещениях с большим количеством мебели и со стеклянными перегородками с металлическими каркасами. Планирование беспроводных сетей в помещении может проводиться или на основании эмпирических моделей, или с учетом конкретного расположения препятствий при непосредственной установке аппаратуры.

Литература

1. *Гуреев А.В., Кустов В.А.* Волноводная модель беспроводных каналов связи внутри зданий // Электронный журнал «Исследовано в России». – 2002. – № 135. С. 1519–1536 (<http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/135.pdf>).
2. *Motley A.J., Keenan J.M.* Radio coverage in buildings // Bell System Technical Journal (BTSJ). – 1990. – Vol. 8. – P. 19–24.
3. *Wolfe G.F., Landstorfer M.* Dominant Paths for the Field Strength Prediction // in 48-th IEEE International Conference on Vehicular Technology (VTC), (Ottawa). – 1998. – P. 552–556.
4. *Huschka T.* Ray Tracing Models for Indoor Environments and their Computational Complexity // in IEEE 5-th International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). – 1994. – P. 486–490.

Поступило 28 марта 2007 г.

Пронин Алексей Александрович – ведущий инженер-электроник кафедры телекоммуникационных систем (ТКС) МИЭТ. *Область научных интересов:* телекоммуникации, беспроводные связи, радиоизмерения.

Кондратов Александр Викторович – студент МИЭТ. *Область научных интересов:* беспроводные связи.

Аунг Мьинт Эй – аспирант кафедры ТКС МИЭТ. *Область научных интересов:* телекоммуникации, беспроводные связи, радиоизмерения.

УДК 541.13:621.315.592.3

Особенности процессов гальваностатического анодирования алюминия, кремния и пленок нитрида кремния

Л.П.Милешко

Технологический институт Южного федерального университета в г. Таганроге

Кинетика анодного окисления Al, Si и Si₃N₄-Si-структур достаточно подробно исследована [1, 2]. Однако вопрос о природе контролирующей стадии, процессах образования анодных оксидных пленок (АОП) этих материалов при постоянной плотности тока на линейных участках зависимостей напряжения формирования U_{ϕ} от времени электролитического анодирования t остается открытым.

В связи с этим были аппроксимированы зависимости скорости роста формирующего напряжения dU_{ϕ}/dt от плотности тока j_{Γ} , построенные в [1] по гальваностатическим кривым, приведенным в [3–7], которые хорошо спрямляются в логарифмических координатах, выражением $dU_{\phi}/dt = \alpha j_{\Gamma}^{\beta}$.

© Л.П.Милешко, 2007

Значения параметров α и β в аппроксимирующем выражении $dU_{\phi}/dt = \alpha j_r^{\beta}$ для экспериментальных кривых в интервалах линейной зависимости напряжения формирования U_{ϕ} от времени гальваностатического анодирования t различных материалов

Материал	Состав электролита	Литература	Диапазон j_r , А/м ²	α , В/с (А/м ²) ^{-β}	β	γ , %
Al (вакуумно-напыленный)	Этиленгликоль (ЭГ) + H ₂ O (1:1) + 3% виннокислого аммония	[3]	25–100	$9,23 \cdot 10^{-2}$	1,49	$\pm 2,6$
КЭФ-4,5	ЭГ + 0,04 н KNO ₃	[4]	30–100	$1,20 \cdot 10^{-3}$	1,18	$\pm 1,3$
КДБ-4,5	ЭГ + 0,04 н KNO ₃	[4]	30–100	$8,80 \cdot 10^{-4}$	1,21	$\pm 1,7$
Si ₃ N ₄	ЭГ + 0,04 н KNO ₃	[5]	50–200	$4,54 \cdot 10^{-4}$	1,30	$\pm 2,2$
КЭФ-0,5	ЭГ + Na ₃ PO ₄	[6]	80–150	$3,90 \cdot 10^{-3}$	1,16	$\pm 4,3$
КЭФ-0,5	ЭГ + 0,04 н KNO ₃	[6]	50–200	$2,74 \cdot 10^{-3}$	1,15	$\pm 5,9$
КЭФ-0,5	Этиловый спирт + 0,16 н NH ₄ NO ₃	[7]	50–200	$2,0 \cdot 10^{-4}$	1,75	$\pm 6,7$

Как следует из таблицы, среднее отклонение γ экспериментальных значений dU_{ϕ}/dt от вычисленных по аппроксимирующему выражению не превышает 7%. Следовательно, для всех трех материалов, с точностью не меньшей значения γ , справедлив экспоненциальный закон Гюнтершульце и Бетца для ионной составляющей j_+ анодной плотности тока от напряженности электрического поля E в АОП:

$$j_+ = A \exp(BE), \quad (1)$$

где A и B – постоянные величины.

В [1, 8] показано, что в случае удовлетворительной аппроксимации формулой $dU_{\phi}/dt = \alpha j_r^{\beta}$ экспериментальных зависимостей dU_{ϕ}/dt , j_r имеет место преобразование (1) в аналогичную формулу:

$$j_r = A^* \exp(B^*E), \quad (2)$$

где $A^* = \left(\frac{Ak^*}{m\alpha}\right)^{\frac{1}{\beta}}$; $B^* = B/\beta$; $k^* = \mathcal{E}/\rho F$; \mathcal{E} – химический эквивалент; ρ – средняя плотность вещества АОП; F – число Фарадея; $m = B/(\ln j_+ - \ln A)$.

Зависимости (1) и (2) указывают на активационный контроль [9].

Таким образом, процесс образования анодных оксидных пленок алюминия, кремния и нитрида кремния в диапазонах линейной зависимости напряжения формирования от времени протекает с активационным контролем.

Литература

1. Сорокин И.Н., Сеченов Д.А., Милешко Л.П., Гатько Л.Е. Методические указания по изучению курса «Физико-химические процессы в технологии радиоэлектронной аппаратуры» по теме: «Электрохимические процессы в технологии РЭА». Ч. II. Анодное окисление полупроводников. – Таганрог: ТРТИ, 1986. – 83 с.
2. Одынец Л.Л., Орлов В.М. Анодные оксидные пленки. – Л.: Наука, 1990. – 200 с.
3. Мелиоранская С.В. Получение пленочных конденсаторов с максимальной удельной емкостью на основе анодированного алюминия // В сб.: «Радиофизика и микроэлектроника». – Воронеж, 1970. – С. 79–85.
4. Мамина С.П., Одынец Л.Л. Электрохимическое окисление кремния в этиленгликоле // Электрохимия. – 1966. – Т. 2. – Вып. 3. – С. 346–350.
5. Dell'Oca C.J. Properties of anodic oxide films formed in the anodization of silicon nitride // J. Electrochem. Soc. – 1973. – Vol. 120. – № 9. – P. 1226–1230.
6. Угай Я.А., Анохин В.З., Владимирова Л.Н., Анохина А.И. Анодное окисление кремния в этиленгликоле в присутствии кислородсодержащих анионов элементов V группы и бора // В сб.: «Полупроводниковые материалы и их применение». – Воронеж, 1974. – С. 136–140.

7. Угай Я.А., Шаталов А.Я., Анохин В.З., Владимиров Л.Н. Особенности анодного окисления кремния в гальваностатическом режиме // В кн.: «Нитевидные кристаллы и тонкие пленки». Ч. 2. – Воронеж, 1975. – С. 410–415.
8. Милешко Л.П., Варзарёв Ю.Н. Кинетические и термодинамические особенности анодного окисления карбида кремния в электролитах на основе этиленгликоля // ФХОМ. – 2000. – № 2. – С. 45–48.
9. Васько А.Т., Ковач С.К. Электрохимия тугоплавких металлов. – Киев.: Техніка, 1983. – 160 с.

Поступило
9 ноября 2006 г.

Милешко Леонид Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры химии и экологии ТТИ ЮФУ. *Область научных интересов:* физико-химические основы и экологическая безопасность микро- и нанотехнологий с применением электрохимических методов.

УДК 621.313.13-133.3:62-83 (088.8)

Система управления соотношением скоростей двухкоординатного шагового привода

Н.Д.Дубовой, В.И.Демкин, Со Лин Аунг

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

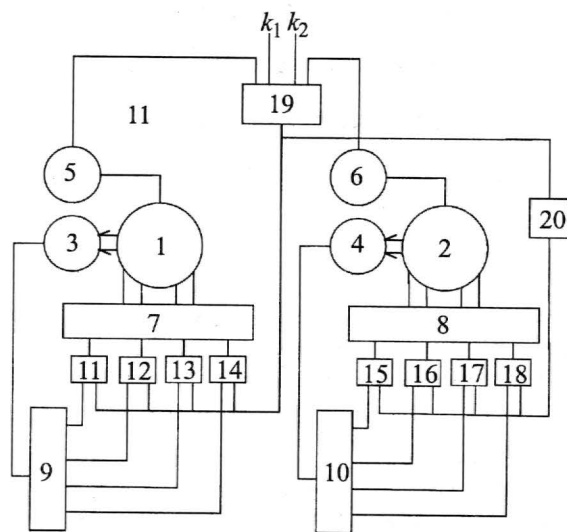
В работе приведены результаты исследования математической модели системы управления соотношением скоростей двухкоординатного шагового привода в программном пакете MATLAB [1] с применением методов полного факторного эксперимента (ПФЭ) [2]. Целью исследования является:

- выявление изменения отношения скоростей относительно заданного соотношения при изменении параметров двигателей и нагрузки;
- определение уровня скоростей обоих двигателей для оценки быстродействия системы;
- получение полиномов скоростей вращения обоих двигателей в зависимости от их параметров, нагрузки и заданного соотношения скоростей.

Один из вариантов системы управления соотношением скоростей двухкоординатного шагового привода показан на рисунке. Шаговые двигатели 1 и 2 с датчиками положения ротора 3 и 4, соединенные с фазными усилителями 7 и 8 мощности, работают в режиме бесконтактной машины постоянного тока.

Коммутация фаз обеспечивается подачей с выходов распределителей 9 и 10 импульсов на первые входы логических элементов 11–14 и 15–18. Сигналы с выходов датчиков скорости 5 и 6 подаются на входы компаратора 19 с различными коэффициентами усиления k_1 и k_2 . Отношение k_1/k_2 определяет отношение скоростей обоих двигателей. Выход компаратора соединен со вторыми входами логических элементов И 11–14 первого двигателя и через логический элемент НЕ 20 со вторыми входами логических элементов И 15–18 второго двигателя.

Когда соотношение текущих скоростей ω_1/ω_2 двигателей меньше требуемого соотношения скоростей k_1/k_2 , на выходе компаратора появляется сигнал высокого уровня, поступающий на вторые входы элементов И, относящихся к первому двигателю. При этом первый двигатель начинает разгоняться, вследствие чего скорость его повышается, а второй двигатель тормозится и соотношение текущих скоростей двигателей увеличивается.



Функциональная схема системы управления соотношением скоростей двухкоординатного шагового привода

В том случае, когда ω_1/ω_2 больше требуемого соотношения скоростей k_1/k_2 , на выходе компаратора появляется сигнал низкого уровня, который через логический элемент НЕ поступает на вторые входы элементов И, относящихся ко второму двигателю. При этом второй двигатель разгоняется, а первый двигатель тормозится и соотношение текущих скоростей ω_1/ω_2 двигателей уменьшается.

Рассматриваемая система имеет следующие безразмерные параметры [3]: $\mu_{н1}, \mu_{н2}$ – относительные моменты нагрузки первого и второго двигателя; α_1, α_2 – постоянные времени обмотки управления первого и второго двигателя; δ_1, δ_2 – внутреннее демпфирование первого и второго двигателя; $\xi = k_1/k_2$ – заданное соотношение скоростей.

Параметры обоих двигателей равны, т.е. $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ и $\delta_1 = \delta_2 = \delta$.

Тогда скорость каждого двигателя определяется зависимостью $\omega = f(\mu_{н1}, \mu_{н2}, \alpha, \delta, \xi)$. В результате реализации плана полного факторного эксперимента полиномы скорости равны:

для первого двигателя

$$\omega_1 = 2,26 + 2,82\xi - 3,20\alpha - 2,68\delta - 5,63\mu_{н1} - 9,68\mu_{н2} - 2,29\delta\xi - 2,23\mu_{н2}\xi + 18,31\mu_{н1}\mu_{н2} - 2,01\alpha\xi + 13,31\mu_{н1}\alpha - 3,40\mu_{н1}\xi + 22,75\mu_{н2}\alpha;$$

для второго двигателя

$$\omega_2 = 8,43 - 1,71\xi - 2,32\alpha - 19,56\delta - 0,28\mu_{н1} - 14,24\mu_{н2} + 2,01\delta\xi + 24,04\mu_{н2}\delta + 3,5\mu_{н2}\xi - 23,38\mu_{н1}\alpha + 19,47\mu_{н1}\delta + 15,39\alpha\delta.$$

Адекватность полиномов проверялась по критерию Фишера, а также путем проведения контрольного опыта при средних значениях параметров двигателя и нагрузки. Следовательно, полученные зависимости можно признать адекватными.

Рассматриваемая система предназначена для обработки сложных криволинейных контуров и реализует движение по двум координатам одновременно. В этом случае текущее соотношение скоростей по координатам движения определяет наклон участка формируемой кривой на плоскости. Таким образом, с помощью рассматриваемой системы, задавая различные соотношения ξ , можно получить любую произвольную фигуру на плоскости с высокой точностью.

Литература

1. *Лазарев Ю.* Моделирование процессов и систем в MATLAB. Учебный курс. – СПб.: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2005. – 512 с.
2. *Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П.* Планирование эксперимента в электромеханике. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.
3. *Ивоботенко Б.А., Рубцов В.П., Садовский и др.* Дискретный электропривод с шаговыми двигателями / Под общ. ред. *М.Г. Чиликина* – М.: Энергия, 1971. – 624 с.

Поступило
14 мая 2007 г.

Дубовой Николай Дмитриевич – доктор технических наук, профессор, начальник научно-исследовательской лаборатории управляющих информационных систем МИЭТ. *Область научных интересов:* автоматические системы управления, контроля и диагностики, многофункциональная электроника и микроэлектроника, автоматизация технологических процессов.

Демкин Василий Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматического управления и контроля МИЭТ. *Область научных интересов:* автоматические системы управления, системы управления электроприводом с шаговыми двигателями, автоматизация технологических процессов.

Со Лин Аунг – аспирант кафедры систем автоматического управления и контроля МИЭТ. *Область научных интересов:* автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.



Издательско-полиграфический комплекс
Московского государственного института электронной техники
информирует



Вышло в свет учебное пособие

С.А. Бахвалова
Основы конструирования РЭС. Часть 1.



ISBN 978-5-7256-0463-4
Формат 60 x 84 1/16,
объем 152 с.: ил.

Изложены общие вопросы разработки и создания конструкций РЭС разных уровней иерархии; рассмотрены основы системного подхода к их проектированию; приведены сведения об элементной базе РЭС, а также о зарубежных материалах плат. Даны рекомендации по выполнению конструкторской документации в соответствии с требованиями стандартов ЕСКД. Рассмотрены особенности конструирования РЭС диапазона СВЧ. Описана последовательность действий при проектировании гибридных интегральных схем и печатных плат СВЧ-устройств с использованием программы Microwave Office. Приведены примеры конструктивной реализации современных РЭС.

Предназначено для студентов 4-го курса факультета МПИТК МИЭТ, обучающихся по специальности «Радиоэлектронные системы» и направлению «Радиотехника».

КОНФЕРЕНЦИИ. ВЫСТАВКИ

ХIII Московская промышленная выставка

С 30 августа по 2 сентября 2007 г. на территории ВВЦ проходила *ХIII Московская промышленная выставка*, приуроченная к празднованию Дня города. В этом году выставка организована под девизом "*Наука. Промышленность. Инвестиции*", что определило основные отличия выставки: присутствие в экспозиции как промышленных предприятий и их продукции, так и передовых разработок научно-технических инновационных предприятий и образовательных институтов. В выставке приняло участие более 300 организаций из многих регионов страны и из стран ближнего зарубежья.

Цель выставки – содействие продвижению отечественных промышленных товаров, продукции и технологий на российском рынке, способствование установлению новых деловых контактов, расширению торгово-экономических связей и кооперации между регионами и столицей России, повышению инновационной активности в научно-технической и производственной сферах промышленности, обеспечению ее технического перевооружения, улучшению конкурентоспо-

собности продукции, ее инвестиционной и экспортной привлекательности.

На открытии выставки мэр Москвы Юрий Лужков отметил важную роль инноваций и инвестиций в экономике города, а также акцентировал внимание на особой экономической зоне «Зеленоград». Основу коллективной экспозиции предприятий Зеленоградского административного округа Москвы составили ведущие предприятия, работающие в области высоких технологий: ОАО «НИИМЭ и завод «Микрон», МИЭТ, ОАО НИИТМ, ГУП НИИ «Субмикрон», ТЦ МП «Миландр», НТ МДТ.

Московский государственный институт электронной техники (технический университет) на выставке представил разработки в области микромеханики (микрорезкала, акселерометры) и нанотехнологии. В конкурсе «Перспективные и инновационные разработки» золотой медалью удостоен совместный проект МИЭТ и компании NanoDevice Technology (бренд ООО «РПСЛ») «Установка для получения углеродных нанотрубок CVDompa» (см. 2 стр. обложки).



Мэр Москвы Лужков Ю.М. и зам. префекта по вопросам науки и промышленности ЗелАО Тельминов А.Л. (слева) на презентации стенда МИЭТ

CONTENTS

Electron engineering materials

<i>V.M.Roschin, V.B.Yakovlev, M.V.Silibin, M.S.Lovyagina</i> Investigation of Nanodimensional PZT Film Properties.....	3
<i>A.N.Chaplygin, E.A.Spirin, A.S.Sizov</i> Influence of Surface Finishing Technology on Electron Transition Kinetics in Surface Areas of Multi-Component Oxide Sillenit Structure Joints.....	8
<i>A.I.Pogalov, A.M.Grushevsky, G.A.Blinov, P.A.Zhukov</i> Study on Mode of Flexible Board Stressed-Deformation Materials	13

Microelectronic devices and systems

<i>V.A.Malyshev, N.A.Mikhailov</i> Taking Account of Spontaneous Radiation Noise Influence in Model of Semiconductor Injection Lasers Stationary Oscillation Stability	18
--	----

Microsystems

<i>S.P.Timoshenkov, A.N.Boiko, B.M.Simonov</i> Methods for Characterization of Micro-Accelerometers and Micro-Mirrors Sensors.....	23
<i>S.A.Zotov</i> Analysis of Influence of Material Anisotropic Properties on Natural Frequencies of Ring Resonators.....	30
<i>E.A.Tutov</i> MOS-Structures with Tungsten Amorphous Trioxide for Capacitive Humidity Sensors	36

Microprocessor systems

<i>U.M.Agafonov, N.S.Akinshin, R.N.Akinshin, K.A.Ankudinov, A.I.Ankudinov, K.U.Kazakov</i> Application of Micro-Controllers for Numerical Finite Automation Synthesis.....	40
--	----

Information technologies

<i>A.S.Likhachev, S.A.Lupin</i> Speech-Conversion Quality Assessment in Low-Bitrate Vocoders at Design Stages	45
<i>Yu.V.Epishin</i> Algorithm for Stability Testing of Linear Model.....	53
<i>D.A.Pogibel'skiy, S.A.Nikitov</i> Optimization of Java Application Meta-Data Structure with Genitive Algorithms	59

University education problems

<i>O.I.Lisov, N.S.Grinenko, Co Co Aung</i> Variety Control of Knowledge Actualization in Educational Process.....	65
<i>Kyaw Kyaw Khine</i> The Programmed Set Complex Of Actualizing Knowledge While Studying The Methods Of Technical Diagnosis	74

Brief reports

<i>A.S.Pashinkin, A.S.Malkova, M.S.Michailova</i> Heat Capacity of Bismuth Telluride Solid Compound.....	80
<i>R.H.Farkhshatov</i> Virtual Filesystem as Metaprotocol for Inter-Process Communications.....	82
<i>D.G.Gromov, G.P.Zhigal'skii, A.V.Karev, I.S.Chulkov</i> Study on Nonlinearity of Volt-Ampere Characteristics of Cu and Ni Thin Films Using Pulse Method.....	84
<i>Aung Myint Aye, A.A.Pronin, A.V.Kondratov</i> Experimental Study of Indoor Radiowave Attenuation at 433 MHz Frequency.....	86
<i>L.P.Mileshko</i> Peculiarities of Processes of Galvanostatic Anodization of Aluminum, Silicon and Silicon Nitride Films.....	88
<i>N.D.Dybovoi, V.I.Demkin, Soe Lin Aung</i> Control system of speed ration of two close-loop stepper motors	90

ABSTRACTS

ELECTRON ENGINEERING MATERIALS

Investigation of Nanodimensional PZT Film Properties

V.M.Roschin, V.B.Yakovlev, M.V.Silibin, M.S.Lovyagina

The film characteristics of PZT solid solutions having 50 – 200 nanometers thickness, obtained on the sapphire and silicon substrates by the low-temperature synthesis from the films of $Ti_{52}F_{48}$ alloy in the atmosphere of the lead oxide, have been investigated. The morphology of the surface and the composition of the PZT films have been studied. The coercive field, residual polarization, the saturation polarization of the samples have been defined. The piezoelectric effect in the films was observed according to the Sawyer-Tower method and the dependence of the hysteresis loop form on size and frequency of the applied voltage.

Influence of Surface Finishing Technology on Electron Transition Kinetics in Surface Areas of Multi-Component Oxide Sillenit Structure Joints

A.N.Chaplygin, E.A.Spirin, A.S.Sizov

The relations between the photocurrent kinetic curve alterations in sillenit crystals under impulse photo activation and the technological features of its surface regions formation have been revealed. A theoretical description of the electric transitions on the sillenit crystals surface adequate to the experimental data has been obtained.

Study on Mode of Flexible Board Stressed-Deformation Materials

A.I.Pogalov, A.M.Grushevsky, G.A.Blinov, P.A.Zhukov

The mode of the flexible board stressed-deformation materials using the Finite Element Analysis (FEA) has been considered. The impact of the design and technological factors on the stressed-deformation mode has been demonstrated, the most important factors of the strength reliability have been determined. The scientifically stipulated recommendations to provide high durability of flexible boards have been presented.

MICROELECTRONIC DEVICES AND SYSTEMS

Taking Account of Spontaneous Radiation Noise Influence in Model of Semiconductor Injection Lasers Stationary Oscillation Stability

V.A.Malyshev, N.A.Mikhailov

The conditions of achievement of the semiconductor injection lasers stationary oscillation stable and unstable modes with taking into account the influence of spontaneous radiation, falling into the resonator working mode and acting as a noise component, have been determined and analyzed.

MICROSYSTEMS

Methods for Characterization of Micro-Accelerometers and Micro-Mirrors Sensors

S.P.Timoshenkov, A.N.Boiko, B.M.Simonov

The results of using the research methods, developed for measurement of the micro-mechanical elements parameters, have been presented. These methods combined with the calculation results have been used for determination of the experimental micro-mirrors parameters.

Analysis of Influence of Material Anisotropic Properties on Natural Frequencies of Ring Resonators

S.A.Zotov

The design of the MEMS gyro ring resonator has been described, and its dynamics mathematical model has been presented. The influence of the construction material anisotropic properties on natural frequencies of the MEMS gyro ring resonator as well as on the device errors has been investigated.

MOS-Structures with Tungsten Amorphous Trioxide for Capacitive Humidity Sensors

E.A.Tutov

The electric-physical characteristics of Al/a-WO₃/n-Si structures under the water vapor sorption conditions have been investigated. The parameters of this structure as a capacitive humidity sensor have been determined.

MICROPROCESSOR SYSTEMS

Application of Micro-Controllers for Numerical Finite Automation Synthesis

U.M.Agafonov, N.S.Akinshin, R.N.Akinshin, K.A.Ankudinov, A.I.Ankudinov, K.U.Kazakov

The statistical analysis and the probability evaluation of the data memory cells efficiency in the EEPROM micro-controllers of PIC16F877 series have been performed, the table of the probability of the memory cells failures in the function due to «erasing – recording» cycles number quantity has been composed. It makes possible to evaluate the reliability of the synthesized numerical finite automations.

INFORMATION TECHNOLOGIES

Speech-Conversion Quality Assessment in Low-Bitrate Vocoders at Design Stages

A.S.Likhachev, S.A.Lupin

The method of the analysis of the speech conversion efficiency, taking into account the specificity of speech signals processing by the low-bitrate vocoders for the purpose to increase the synthesis process efficiency and to improve the technical-economical and operation characteristics, has been presented. In the technique the analytical and the program model for an assessment of the quality of the speech information transformation, using a comparative analysis of signal spectral characteristics distortions, have been used. The use of such approach permits to considerably reduce the «feedback» time during device development, updating, in finding the system site optimum adjustments, etc.

Algorithm for Stability Testing of Linear Model

Yu.V.Epishin

An algorithm for the linear model Lyapunov stability test has been considered. This algorithm applies to the graph of the model. The calculation expenditures of this algorithm and of those ones, working directly with the system matrix, have been presented. The methods of accelerating the graph algorithm work have been proposed.

Optimization of Java Application Meta-Data Structure with Genitive Algorithms

D.A.Pogibel'skiy, S.A.Nikitov

The model of the Java application execution process from the point of view of the meta-data usage at runtime has been considered. The formal criterion of the meta-data runtime structure effectiveness has been proposed. The ability of the genitive algorithms in solving the structure optimization problem has been studied. The effectiveness of such approach has been illustrated on an example.

UNIVERSITY EDUCATION PROBLEMS

Variety Control of Knowledge Actualization in Educational Process

O.I.Lisov, N.S.Grinenko, Co Co Aung

Some issues of the variety management of the knowledge actualization process in the educational process, using the up-to-date intellectual information technologies, have been considered. Some aspects of the variety control technologies based on the control base technologies in the hierarchical multi-level systems have been presented. The process of building the content of the program-methodical complexes in the Variety control of knowledge actualization in the educational process has been discussed.

The Programmed Set Complex Of Actualizing Knowledge While Studying The Methods Of Technical Diagnosis

Kyaw Kyaw Khine

The problems of constructing the Automated Teaching System in diagnosis using E-learning technologies have been discussed. Different ways of generating tests for this system have been proposed. Methods of Technical Diagnosis are the Subject field of the Automated Teaching System.

BRIEF REPORTS

Heat Capacity of Bismuth Telluride Solid Compound

A.S.Pashinkin, A.S.Malkova, M.S.Michailova

The experimental data for heat capacities of Bi_2Te_3 solid compound taken from literature have been analyzed in 1,37 to 923 K range. The heat capacities have been measured for bismuth telluride (Bi_2Te_3) over the temperature range 360 to 600 K using the DSM-2M calorimeter. The equation for the temperature dependence of heat capacities of the Bi_2Te_3 solid compound has been obtained and, also, the thermodynamic functions ($H_T - H_{298}$, Φ_T^{xx} , S_T , C_p) calculated from 298 to 700 K have been given.

Virtual Filesystem as Metaprotocol for Inter-Process Communications

R.H.Farkhshatov

A general metaprotocol for communication of modules in a distributed system has been described. The metaprotocol is based on the information space representation of the distributed system in a form of a virtual filesystem supporting the multiple views of files.

Study on Nonlinearity of Volt-Ampere Characteristics of Cu and Ni Thin Films Using Pulse Method

D.G.Gromov, G.P.Zhigal'skii, A.V.Karev, I.A.Karev, I.S.Chulkov

The VAC nonlinearity and $1/f$ noise in the metal film of decreased dimension, made of nickel and copper, have been investigated. The measurement results show that the metal conductivity is the main mechanism of conductivity in the tested samples of Cu and Ni films, and the inertial processes connected with the heat exchange between the film and the substrate are the cause of the VAC nonlinearity. The power spectral density of noise depends according to $S \sim 1/f$, where $\gamma \approx 1,5 \dots 2$, that may correlate with $1/f$ noise, connected with the electromigration process.

Experimental Study of Indoor Radiowave Attenuation at 433 MHz Frequency

Aung Myint Aye, A.A.Pronin, A.V.Kondratov

The results of the experimental study of the indoor radiowave attenuation at 433 MHz frequency have been presented. All measurements were carried out using the Rohde and Schwarz equipment.

Peculiarities of Processes of Galvanostatic Anodization of Aluminum, Silicon and Silicon Nitride Films

L.P.Mileshko

It has been shown that the process of forming the anode oxide films of Al, Si and Si_3N_4 within the range of the linear dependence of the forming voltage on time proceeds with the activation control.

Control System of Speed Ratio Of Two Close-Loop Stepper Motors

N.D.Dybovoi, V.I.Demkin, Soe Lin Aung

The control system of speed ratio of two stepper motors has been considered. The system works under the given speed ratio not only at the steady state but also in all transient processes of acceleration, reverse and deceleration. By means of the considered system it is possible to receive any figure on a plane with high accuracy. The considered system has been investigated in the program MATLAB by using methods of complete factorial experiment.