

Известия высших учебных заведений

ЭЛЕКТРОНИКА 2'2006

Научно-технический журнал

Издаётся с 1996 г.

Выходит 6 раз в год

СОДЕРЖАНИЕ

Технология микроэлектроники

Барабан А.П., Петров Ю.В., Сазонов С.Г. Электролюминесценция структур Si-SiO₂, содержащих избыточный кремний..... 3

Зайцев Н.А., Матюшкин И.В. Исследование кинетики начального этапа высокотемпературного окисления кремния в сухом кислороде..... 9

Микроэлектроника и полупроводниковые приборы

Безрядин Н.Н., Ассессоров В.В., Сизов С.В., Михайлюк Е.А., Сыноров Ю.В., Кузьменко Т.А., Пахомов В.Н. Влияние металла на поверхностные электронные состояния кремния в слоистой системе Me-Ga₂Se₃-(SiO₂)Si..... 18

Широков А.А., Сергеев В.А., Дулов О.А. Исследование токораспределения в биполярных транзисторах электрофлюктуационным методом..... 26

Алексеев Ю.И., Малиёв И.В., Нащанский С.А. Исследование влияния лазерного излучения на частоту колебаний ганновского генератора..... 34

Григорашвили Ю.Е., Карпов Р.Г., Степанов А.М. Метод локации источников слабых магнитных полей..... 37

Информационные технологии

Гагарина Л.Г., Слюсарь В.В. Методология оценки эффективности работы автоматизированной информационно-поисковой системы на основе интегральных критериев уровня качества поиска..... 42

Власов А.А., Скулкин Н.М., Зуев А.В. Использование экспертной системы для распознавания дефектов металлокерамических корпусов и коммутационных плат..... 47



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.
Казённых Г.Г.
Коноплёв Б.Г.
Конаев Ю.В.
Коркишко Ю.Н.
Королёв М.А.
Кубарев Ю.В.
Неволин В.К.
Неволин В.Н.
Петросянец К.О.
Преснухин Л.Н.
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.miet.ru
<http://www.miet.ru>

Схемотехника и проектирование

Соколов А.Г., Чепурных Е.А. Комплекс программ для автоматизированного проектирования интерфейсов цифрового оборудования..... 52

Артемьев С.А. Конвертор для перевода проектов схем из САПР ПЛИС в САПР БМК..... 57

Интегральные радиоэлектронные устройства

Чистюхин В.В., Лялин К.С., Сизов В.И., Кочетков В.Ю. Пространственное подавление помех с использованием цифровой антенной решетки..... 64

Зиновьев Д.В. Система ФАПЧ на цифровых логических элементах..... 71

Микросистемы

Комиссаров А.В., Степанов Н.В. Методы расширения диапазона измерений угловых скоростей микромеханических гироскопов ADXRS150, ADXRS300..... 77

Микропроцессорная техника

Капустян С.Г. Децентрализованный метод коллективного распределения целей в группе роботов..... 84

Краткие сообщения

Неустроев А.С., Неустроев С.А. Сопоставление рентгеновского и пикнометрического методов оценки качества слоев нитрида алюминия..... 92

Малкова А.С., Пашинкин А.С., Надыров Ш.М. Теплоемкость антимонидов алюминия, галлия, индия..... 94

Шорин Д.В. Методика разработки многофункциональной операционной системы для смарт-карты..... 96

Юбилей

Коледову Леониду Александровичу – 70 лет..... 97

Конференции

Десятая международная научная конференция и молодежная школа-семинар «Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники» ПЭМ–2006... 25

Международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в науке, технике и образовании»..... 76

Contents..... 99

Abstracts..... 100

К сведению авторов..... 103

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
М.В.Гергель
А.А.Григорашвили
С.Ю.Рыжков

Подписано в печать 03.04.06
Формат бумаги 60х84 1/8.
Печать офсетная
Объем 12,09 усл.печ.л.,
11,3 уч.-изд.л.
Заказ № 37.

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.

Электролюминесценция структур Si–SiO₂, содержащих избыточный кремний

А.П.Барабан, Ю.В.Петров, С.Г.Сазонов

Санкт-Петербургский государственный университет
НИИ физики им. В.А.Фока

Изучена электролюминесценция структур Si–SiO₂, подвергнутых ионной имплантации кремния в окисный слой с энергией 150 кэВ и дозами от $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ до $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, а также постимплантационному отжигу в атмосфере N₂ при температуре 1100 °С. Показано появление в результате ионной имплантации двух полос в спектре электролюминесценции с энергиями 2,7 эВ и 4,3 эВ, которые, по-видимому, связаны с двухкоординированным по кислороду кремнием. В результате отжига в спектре появляется полоса с энергией 1,6 эВ, которую можно связать с образованием кластеров кремния в окисном слое.

Одна из основных задач современной оптоэлектроники – получение стабильной люминесценции в структурах на основе кремния. Особенность структур Si–SiO₂, являющихся основой современной микроэлектроники, заключается в появлении электролюминесценции (ЭЛ) при наличии сильного электрического поля в объеме диэлектрического слоя. Наряду с собственной ЭЛ, связанной с особенностями строения окисного слоя и характером протекающих в нем электронных процессов, в структурах Si–SiO₂ возможно создание наведенной люминесценции путем направленного введения центров люминесценции (ЦЛ) в окисный слой [1]. Одним из способов введения ЦЛ является ионная имплантация в окисный слой [2].

В настоящее время в качестве люминесцирующих структур активно исследуются структуры на основе пористого кремния [3–5] и структуры Si–SiO₂, содержащие в объеме окисного слоя нанокластеры кремния [6–8]. В последнем случае формирование нанокластеров кремния в SiO₂ осуществляется путем ионной имплантации кремния в окисный слой и последующего отжига [7, 8].

Цель настоящей работы – исследование ЭЛ структур Si–SiO₂, содержащих избыточный кремний в окисном слое, введенный путем ионной имплантации.

Исследовались структуры Si–SiO₂ (800 нм), имплантированные ионами Si с энергией 150 кэВ и дозами $5 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (этот диапазон доз соответствует созданию в SiO₂ избыточной концентрации кремния от 5 до 30%). Постимплантационный высокотемпературный отжиг структур проводился при температуре 1000 °С в атмосфере азота в течение 16 ч. Постимплантационный отжиг – при температуре 600 °С на воздухе в течение 2 ч.

Исследования проводились в системе электролит–диэлектрик–полупроводник (ЭДП) методом ЭЛ [1] при условиях возбуждения, исключающих возможность развития процесса ударной ионизации в объеме окисного слоя. Преимущества ЭДП-системы при исследованиях ЭЛ заключаются в возможности инжекции электронов и их разогрева в слоях SiO₂ в широкой области электрических полей, что является одним из необходимых условий возбуждения ЦЛ. Кроме того, возможность контролируемого травливания окисного слоя с одновременным измерением спектров ЭЛ позволяет определять пространственное распределение центров ЭЛ в окисном слое. Спектры ЭЛ регистрировались при температуре 273 К в спектральном диапазоне 900–250 нм.

На рис.1 приведены спектры ЭЛ структур Si–SiO₂ и Si–SiO₂, содержащих избыточный кремний в окисном слое, полученные при идентичных условиях возбуждения. Видно, что ионная имплантация кремния в окисный слой приводит к значительному увеличению интегральной интенсивности ЭЛ, связанной с появлением в спектре ЭЛ двух полос излучения, максимумы которых соответствуют энергиям $(2,75 \pm 0,05)$ эВ и $(4,4 \pm 0,1)$ эВ. Данные полосы аппроксимируются гауссовым распределением с полуширинами $(0,45 \pm 0,05)$ эВ и $(0,6 \pm 0,2)$ эВ соответственно. Интенсивность этих полос экспоненциально возрастает с увеличением напряженности электрического поля в окисном слое и уменьшается после их возбуждения по закону $L = A_0 + A_1 \exp(-t/\tau_1) + A_2 \exp(-t/\tau_2)$, где $\tau_1 = 60$ с, $\tau_2 = 600$ с при постоянной напряженности поля в окисном слое. Увеличение концентрации избыточного кремния в окисном слое приводит к увеличению интенсивности полос излучения – 2,7 и 4,4 эВ. При этом отношение их интенсивностей остается неизменным (рис.2).

Стравливание окисного слоя в сочетании с измерением спектров ЭЛ показало, что ЦЛ, ответственные за полосы излучения 2,7 и 4,4 эВ, расположены в области 550 нм от поверхности кремния. Характерная для ЭЛ структур Si–SiO₂ полоса излучения 1,9 эВ присутствует и в структурах, содержащих избыточный кремний (рис.3). В этом случае ее интенсивность несколько меньше, чем в структурах Si–SiO₂ до имплантации.

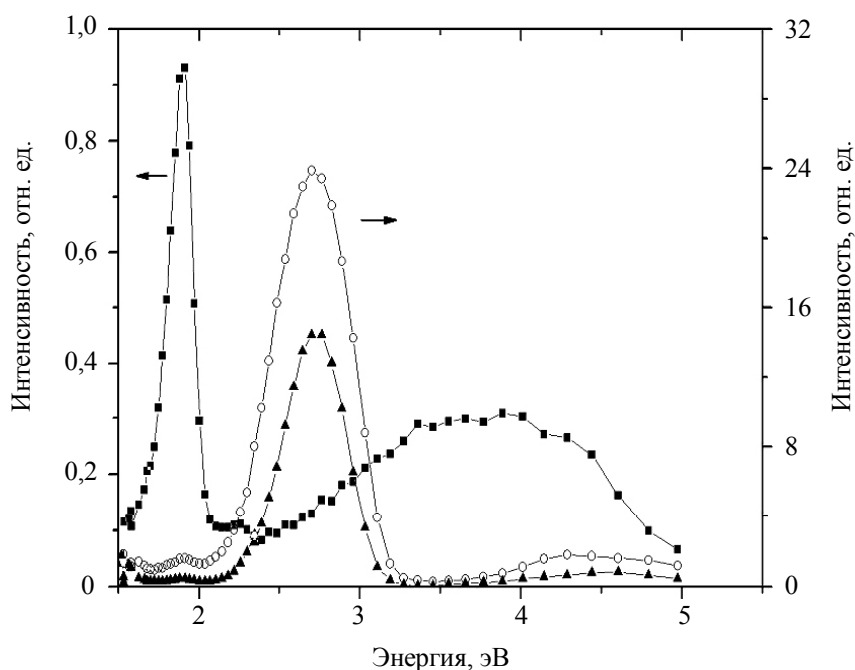


Рис.1. Спектры ЭЛ структур Si–SiO₂ и Si–SiO₂, содержащих избыточный кремний в окисном слое: —■— Si–SiO₂; —○— Si–SiO₂:Si 30%; —▲— Si–SiO₂:Si 20%

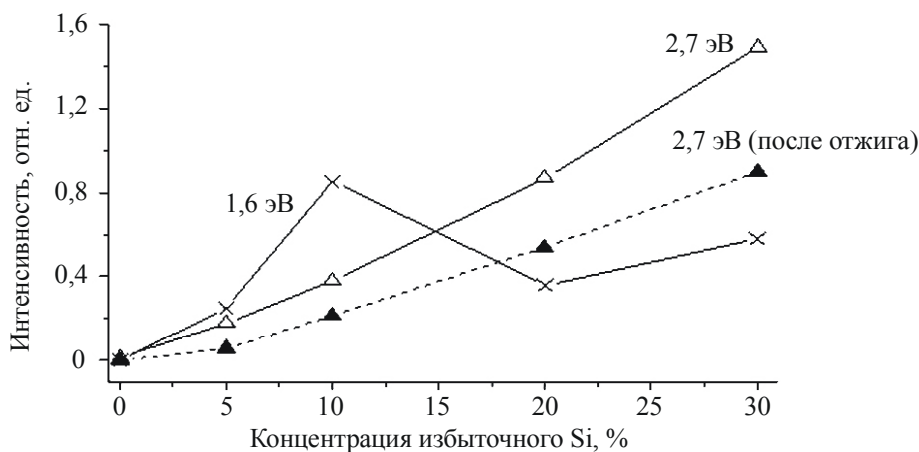


Рис.2. Зависимость интенсивности полос ЭЛ в спектрах структур Si-SiO₂, имплантированных ионами Si, от процентного содержания избыточного кремния в окисном слое

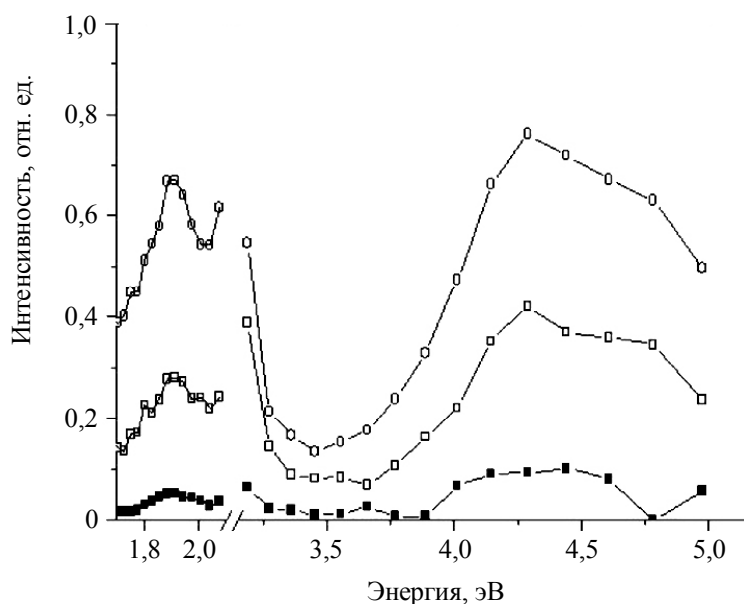


Рис.3. Спектры ЭЛ в красной и УФ-областях спектра (Si-SiO₂:Si 30%):
 -■- 500 В; -□- 513 В; -○- 520 В

Необходимо отметить, что ЭЛ в области ближнего ультрафиолета ($h\nu > 3,5$ эВ) содержит полосы излучения, характерные для неимплантированных структур Si-SiO₂ (см. рис.3) [1]. Это приводит к искажению формы полосы ЭЛ 4,4 эВ, особенно при высоких уровнях возбуждения, т.е. при увеличении напряженности поля в окисном слое.

Последующий отжиг структур приводит к уменьшению интенсивности полос ЭЛ (2,7 и 4,4 эВ) и появлению длинноволновой полосы ЭЛ в области 1,6 эВ (рис.4). Спектральное распределение ЭЛ в УФ-области спектра ($h\nu > 3,5$ эВ) оставалось неизменным при уменьшении интенсивности люминесценции.

На рис.5 приведены спектры ЭЛ структур Si-SiO₂ с различным содержанием избыточного кремния в окисном слое. Наблюдаемые полосы ЭЛ хорошо аппроксимируются гауссовым распределением со следующими параметрами: (2,7 ± 0,06) эВ с полушириной (0,32 ± 0,06) эВ и (1,64 ± 0,08) эВ с полушириной (0,16 ± 0,08) эВ. Вместе с тем необходимо отметить незначительный ~0,05 эВ сдвиг полосы ЭЛ 1,6 эВ в длинноволновую

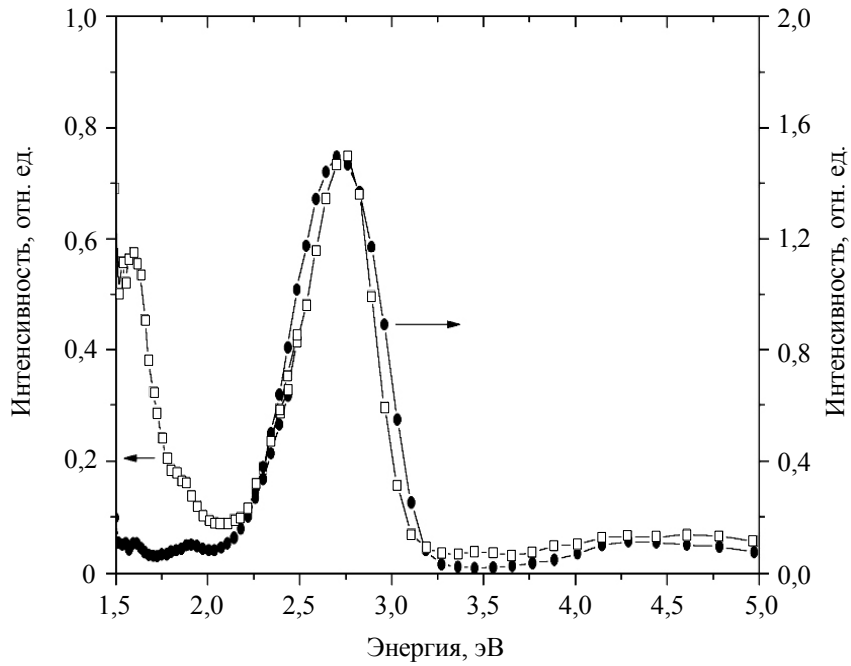


Рис.4. Влияние высокотемпературного отжига на спектральное распределение ЭЛ:
 □— SiO₂:Si 30% (после отжига); ●— SiO₂:Si 30%

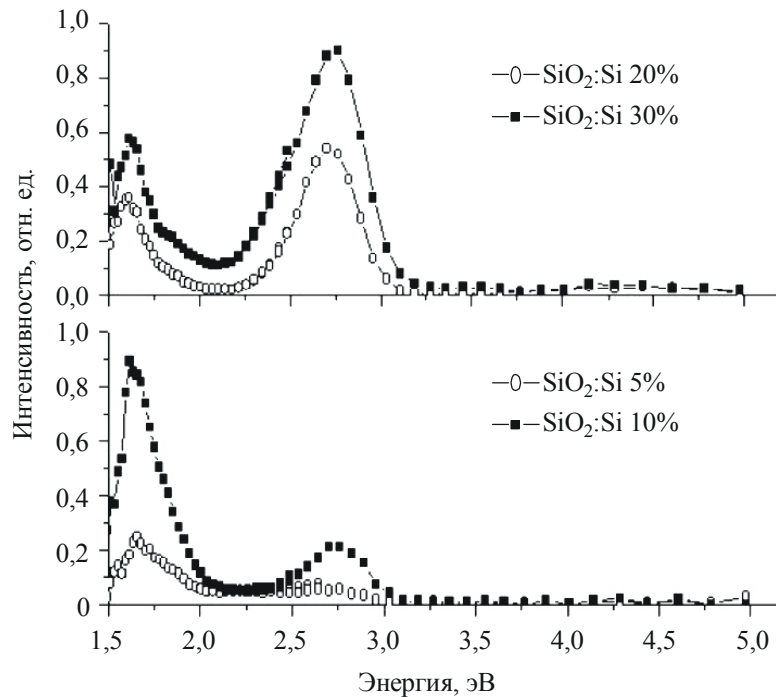


Рис.5. Спектры ЭЛ отожженных структур с различным содержанием избыточного кремния

область спектра при увеличении концентрации избыточного кремния в окисном слое от 5–10% до 20–30%. Из рис.5 видно, что в спектре ЭЛ структур, содержащих 5–10% избыточного кремния, наиболее интенсивной является полоса излучения 1,6 эВ, в то время как в спектрах ЭЛ структур с 20–30% избыточного кремния – полоса 2,7 эВ. Появление полос ЭЛ 1,6 и 2,7 эВ в исследованных структурах наблюдалось при

различных значениях приложенного напряжения, т.е. при разной средней напряженности электрического поля в окисном слое. Пороговая напряженность поля снижалась с 7,6 МВ/см для образцов с 5% избыточного кремния до 5,6 МВ/см для структур с 20% избыточного кремния, а затем возрастала до 6 МВ/см для образцов с 30% избыточного кремния. Интенсивность полос ЭЛ 2,7 и 1,6 эВ экспоненциально возрастала с увеличением средней напряженности электрического поля в окисном слое и сверхлинейно зависела от плотности протекающего через структуру тока.

Ионная имплантация вызывает интенсивное дефектообразование в окисном слое, в том числе и образование дефектов, ответственных за появление полос ЭЛ 2,7 и 4,4 эВ [9]. Такими дефектами, очевидно, являются атомы двухкоординированного по кислороду кремния (O₂=Si:), так называемые силиленовые центры, для которых характерно наличие двух излучательных переходов – 2,7 и 4,4 эВ, возбуждаемых энергией 5 эВ [10]. Отжиг приводит к уменьшению концентрации таких центров за счет восстановления нарушенных имплантацией кремниево-кислородных связей. В результате уменьшается интенсивность полос ЭЛ 2,7 и 4,4 эВ. Высокотемпературный отжиг помимо уменьшения концентрации силиленовых центров приводит к образованию нанокластеров кремния. При этом отжиг структур с различным содержанием избыточного кремния вызывает образование нанокластеров кремния с разными размерами: 3, 3,8 и 5,3 нм для 10, 20 и 30%-ного содержания избыточного кремния в окисном слое соответственно [8].

Наблюдаемое на всех исследованных структурах постоянство (в пределах погрешности) энергетического положения максимума полосы ЭЛ 1,6 эВ не позволяет связать ее происхождение с излучательными переходами в НК кремния. По-видимому, ЭЛ в данной полосе связана с существованием дефектов на границе нанокластеры кремния/SiO₂, которые образуются при формировании нанокластеров кремния в процессе высокотемпературного отжига структур. В качестве центров люминесценции могут выступать дефекты типа трехкоординированного кремния (Si₃ = Si), конкретные свойства которых в этом случае определяются локальным окружением, т.е. строением нанокластеров кремния [11]. При этом концентрация таких дефектов связана с концентрацией избыточного кремния в окисном слое сложным образом, так как она зависит не только от геометрических размеров (площади поверхности одного нанокластера), но и от общего количества нанокластеров кремния (которое, по-видимому, с определенного момента уменьшается с увеличением размеров кластеров). Это находит отражение в немонотонной зависимости интенсивности полосы ЭЛ 1,6 эВ от процентного содержания избыточного кремния в SiO₂ (см. рис.1). Возбуждение данных центров люминесценции происходит за счет их взаимодействия с горячими электронами, образующимися в окисном слое в сильных электрических полях, на что указывают зависимости интенсивности полосы ЭЛ 1,6 эВ от напряженности электрического поля в окисном слое.

Таким образом, избыточное содержание кремния в окисном слое структур Si-SiO₂ порождает образование в объеме SiO₂ силиленовых центров. Отжиг структур Si-SiO₂ приводит к уменьшению концентрации таких центров, а высокотемпературный отжиг – к образованию в окисле нанокластеров кремния, что подтверждается появлением центров ЭЛ 1,6 эВ.

Литература

1. *Барабан А.П., Булавинов В.В., Коноров П.П.* Электроника слоев SiO₂ на кремнии. – Л.: Изд. ЛГУ, 1988. – 304 с.
2. Strong blue and violet photoluminescence from germanium-implanted and silicon-implanted silicon-dioxide layers / *L.Rehohle, J.Borany, R.A.Yankov et al.* // Appl. Phys. Lett. – 1997. – Vol. 71, N 19. – P. 2809–2811.

3. Efficient visible electroluminescence from highly porous silicon under cathodic bias / *L.T.Cahnam, W.Y.Leong, M.I.J.Beale et al.* // Appl. Phys. Lett. – 1992. – Vol. 61. – P. 2563–2565.
4. Electroluminescence of silicon nanocrystals in MOS structures / *G.Franzo, A.Irrera, E.C.Moreira et al.* // Appl. Phys. A. – 2002. – Vol. 74. – P. 1–5.
5. *Song H.Z., Bao X.M., Li N.S., Zhang J.Y.* Relation between electroluminescence and photoluminescence of Si⁺-implanted SiO₂ // J. Appl. Phys. – 1997. – Vol. 82, N 8. – P. 4028–4032.
6. *Jambois O., Rinnert H., Devaux X., Vergnat M.* Photoluminescence and electroluminescence of size-controlled silicon nanocrystallites embedded in SiO₂ thin films // J. J. Appl. Phys. – 2005. – Vol. 98, N 4. – P. 1–3.
7. *Lin Chun-Jung, Lin Gong-Ru.* Defect-enhanced visible electroluminescence of multi-energy silicon-implanted silicon dioxide film // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 2005. – Vol. 41, N 3. – P. 441–447.
8. Correlation between structural and optical properties of Si nanocrystals embedded in SiO₂: The mechanism of visible light emission / *B.Garrido, M.Lopez, O.Gonzales et al.* // Appl. Phys. Lett. – 2000. – Vol. 77, N 20. – P. 1–3.
9. *Барабан А.П., Милоглядова Л.В.* Дефекты и дефектообразование в окисном слое ионно-имплантированных структур кремний–двуокись кремния // ЖТФ. – 2002. – Т. 72. – Вып. 5. – С. 56–60.
10. *Скуя Л.Н., Стрелецкий А.Н., Пакович А.Б.* Спектроскопические свойства двухкоординированных атомов кремния в стеклообразном диоксиде кремния // Физика и химия стекла. – 1988. – Т. 14. – С. 481–489.
11. *White C.T., Ngai K.L.* Reconstructing states at the Si–SiO₂ interface // J. Vacuum Sci. and Techn. – 1979. – Vol. 16, N 5. – P. 1412–1416.

Барабан Александр Петрович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры электроники твердого тела СПбГУ. *Область научных интересов:* неравновесные электронные процессы в тонких диэлектрических слоях на поверхности полупроводников.

Петров Юрий Владимирович – аспирант кафедры электроники твердого тела СПбГУ. *Область научных интересов:* физика полупроводников и диэлектриков.

Сазонов Сильвестр Георгиевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник НИИ физики им. В.А.Фока СПбГУ. *Область научных интересов:* неравновесные электронные процессы в тонких диэлектрических слоях на поверхности полупроводников.

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

С тематическими указателями статей за 1996 - 2005 гг.
и с содержанием последних номеров можно ознакомиться
на нашем сайте:

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

Исследование кинетики начального этапа высокотемпературного окисления кремния в сухом кислороде

Н.А.Зайцев, И.В.Матюшкин

ОАО «НИИМЭ и завод Микрон» (г. Москва)

Рассмотрен начальный этап кинетики высокотемпературного (~1000 °С) окисления кремния в атмосфере сухого кислорода (0,1–1 атм). Расширена полимерная модель окисления путем термодинамического анализа трехкомпонентной системы кремний–вакансии–кислород. В построенной математической модели энтропия и энергия Гиббса данной системы связаны с кинетическими параметрами.

Одной из актуальных задач физики твердого тела и нанотехнологии является исследование начального этапа взаимодействия кислорода с поверхностью кремния. На начальном этапе толщина наращенного SiO₂ составляет несколько десятков моноатомных слоев и наблюдается аномально высокая скорость роста пленки оксида [1]. Кинетика окисления отклоняется от предсказываемой линейно-параболическим законом Дила–Гроува.

В работе предложена физико-химическая модель такого поведения, которая опирается на более ранние работы [2, 3]. Модель не была внутренне замкнутой, наличие вязкоупругой среды полагалось уже заданным. Описание процессов формирования такой среды представлено ниже.

Начальный этап термического окисления. Рассмотрим идеальную ситуацию взаимодействия молекул O₂ в газовой фазе с атомарно чистой поверхностью кремния, т.е. когда удалена пленка естественного окисла, например после предварительного травления в водороде [4–6]. Горизонтальный перенос электронов стабилизирует термодинамическое состояние поверхности [7] и приводит к появлению центров адсорбции O₂. Квантово-химические расчеты [6, 8] этапов адсорбции O₂ на Si позволяют сделать вывод о существовании прекурсоров O₂⁻ и промежуточных активированных комплексов и прекурсоров на пути O₂ → O₂^{*} → 2O⁻. Экспериментально доказано отсутствие островкового механизма роста SiO₂ (диаметр таких островков меньше 50 нм [5, 9, 10]). При преобладании реакции травления процесс неоднороден [11]. Можно формализовать состояние адсорбционного слоя (1-го монослоя) интегральными величинами.

Очевидно, изменение состояния адсорбционного слоя приведет к разрушению сложившейся до окисления структуры 2-го подповерхностного монослоя. Опосредованно это влияние скажется на 3-м и, возможно, 4-м монослое.

Если учитывать только поперечные механические напряжения, то можно предположить активное формирование 2-го и 3-го монослоев и интенсивную генерацию вакансий и даже вакансионных кластеров. Известно, что механические напряжения имеют разные механизмы релаксации, и прежде всего это формирование точечных дефектов: вакансий и междоузлий. Свободный объем, образующийся при расширении монослоев, препятствует возникновению междоузлий. Причины одновременного роста

2-го и 3-го монослоев, вероятно, следующие: адатомы O^- адсорбционного слоя притягивают к себе атомы кремния 2-го монослоя больше, чем притягивают их атомы 3-го монослоя; так как связь $Si-O$ сильнее связи $Si-Si$; выделение тепловой энергии хемосорбции приводит к увеличению энергии колебательного движения атомов по крайней мере двух подповерхностных монослоев, что ведет к увеличению длины и ослаблению $Si-Si$ связи. Таким образом, 2-й и 3-й монослои по мере адсорбции кислорода «разрыхляются», в них появляются поры.

Поскольку образование вакансий и вакансионных кластеров происходит одновременно с продолжающейся адсорбцией, то нужно рассмотреть влияние отмеченного «разрыхления» на состояние адсорбционного монослоя (константы и количество центров адсорбции, нескомпенсированные заряды в подповерхностном слое, изменение рельефа поверхности).

При ускоренной диффузии окислителя в подповерхностные слои кремния локальная активация адатомов O способствует их термодиффузии по поверхности и в глубь кремния. Пока концентрация атомов кислорода в подповерхностных слоях мала, то никаких устойчивых связей $Si-O$ не образуется, а происходит диффузия окислителя по поверхности. Эти процессы одновременны и охватывают не только 2-й и 3-й монослои, но и два-три последующих монослоя, т.е. всего четыре-шесть монослоев. Таким образом, имеется «конкуренция» между заполнением кислородом поверхности кремния и насыщением кислородом подповерхностных слоев.

Постулируем существование пороговой концентрации кислорода в кремнии, при которой начинается быстрый фазовый переход. В подповерхностных слоях происходит химическая реакция кремния с кислородом и изменение скрытой теплоты плавления. Образовавшаяся при этом жидкая фаза многокомпонентна: в ней содержатся кремниевые и Si_xO_y -кластеры, начинают зарождаться малозвенные полимеры. Молекулы O_2 из газовой среды почти беспрепятственно переходят в жидкость, окисляя полимерные молекулы вплоть до образования цепочек из тетраэдров SiO_4^{4-} , как и в полимерной модели. Возникают вопросы о величине пороговой концентрации, ее зависимости от температуры и связи с предельной растворимостью кислорода в объемном кремнии. Не ясно также, можно ли считать соответствующими линейному участку окисления процессы закольцовывания полимеров, резкое повышение вязкости (сходное со стеклованием) и последующее образование псевдоупругой жидкости с границей SiO_2 -газ.

В связи с отмеченной «пористостью» подповерхностных монослоев кремния пороговая концентрация в десятки раз выше предельной растворимости, достигая сотых долей от стехиометрической концентрации. Промежуток времени, в течение которого концентрация будет достигнута, можно назвать скрытым периодом окисления. Очевидно, здесь играет важную роль значение коэффициента диффузии кислорода (O^-) в подповерхностном слое кремния. Пороговая концентрация, по-видимому, достигается одновременно как на поверхности Si -газ, так и во всех подповерхностных монослоях. Количество этих слоев ограничено. Слоев не должно быть много, поскольку воздействие адсорбционного слоя резко падает при переходе от поверхности к объему подложки (на практике для реальных кремниевых подложек всегда существует частично нарушенный подповерхностный слой кремния). Слоев не должно быть мало, что следует из необходимости свободного вращения Si_xO_y -мономеров в жидкой фазе и из термодинамических соображений (минимизация энергии Гиббса системы) существования любой фазы.

Таким образом, на начальном этапе окисления целесообразно деление монослоев на 1-й, затем 2, 3 и 4, 5, 6-й. Остальные монослои не имеют значения, и приповерхностный слой реагирует на избыток кислорода как единое целое. Далее вновь происходит диверсификация этого слоя, ставшего в терминах полимерной модели «пограничным», поскольку на его компонентный состав оказывает влияние поток тепла и мономера из активной зоны на границе Si/SiO₂. Очевидно, сразу после фазового превращения твердое тело–жидкость скорость суммарной химической реакции максимальна, что соответствует аномальному участку роста. Промежуточным участком, по-видимому, является этап образования полимерных цепочек и колец, сопровождающийся понижением в десятки раз коэффициента диффузии кислорода. Его длительность связана также и с доокислением 10-, 11-, 12-членных полимерных цепей. Если температура окисления чуть ниже 950 °С, например около 900 °С, то происходит процесс стеклования, и после перехода жидкость–аморфное тело (затруднительно классифицировать его как фазовый) вновь становится значимой адсорбция, но уже на поверхности SiO₂–газ, и возникает линейный участок.

Итак, схема начального этапа окисления кремния в высокотемпературном пределе выглядит (рис.1) следующим образом:

- формирование адсорбционного монослоя и перестройка поверхности кремния (рис.1,*a*);
- интенсивная генерация вакансий во 2-м и 3-м подповерхностных монослоях Si и ускоренная диффузия O⁻ внутри последних (рис.1,*б*);
- перестройка смешанной кислородно-кремниевой поверхности (рис.1,*в*);
- скрытый период окисления (период индукции [11]): накопление кислорода примерно в пяти подповерхностных слоях Si (рис.1,*г*);
- фазовый переход кристалл–жидкость при достижении пороговой концентрации кислорода (рис.1,*д*);
- стеклование или увеличение вязкости начального пограничного слоя, завершающееся переходом в линейный режим окисления (рис.1,*е*).

Математическая модель начального этапа термического окисления. При моделировании кинетики окисления обычно используют дифференциальные уравнения для анализа приращения толщины слоя диоксида кремния dx_0 за малый промежуток времени dt . В рассматриваемом случае такой подход неприменим, поскольку нужно учитывать дискретное количество моноатомных слоев. Шириной моноатомного слоя будем считать расстояние между атомными плоскостями [12]. Расчет времени окисления каждого монослоя для начального этапа окисления проводиться не будет, так как в рамках предлагаемой модели окисление носит взрывной характер после периода индукции. Интерес представляет глубина превращения Si в SiO₂, выраженная, например, через степень окисления или массовое отношение атомов Si и O. Рассмотрим период индукции и процессы, происходящие в этот период. При формулировке модели не будем разделять подповерхностный слой кремния на пять-шесть монослоев, но отдельно опишем адсорбционный слой (см. рис.1).

В фазе индукции никаких химических реакций, кроме процессов хемосорбции, в приповерхностном слое кремния не происходит. Однако накопление кислородного агента внутри него изменяет термодинамические свойства системы, в которой кислород играет роль примеси, и его присутствие понижает эффективную температуру плавления кремния ($T_{пл} \approx 1400$ °С). Можно оспорить равновесность происходящих при этом процессов, внешним проявлением которых является генерация свободного объема через увеличение толщины слоя и растяжение связей Si–Si. Хотя замедленность процесса

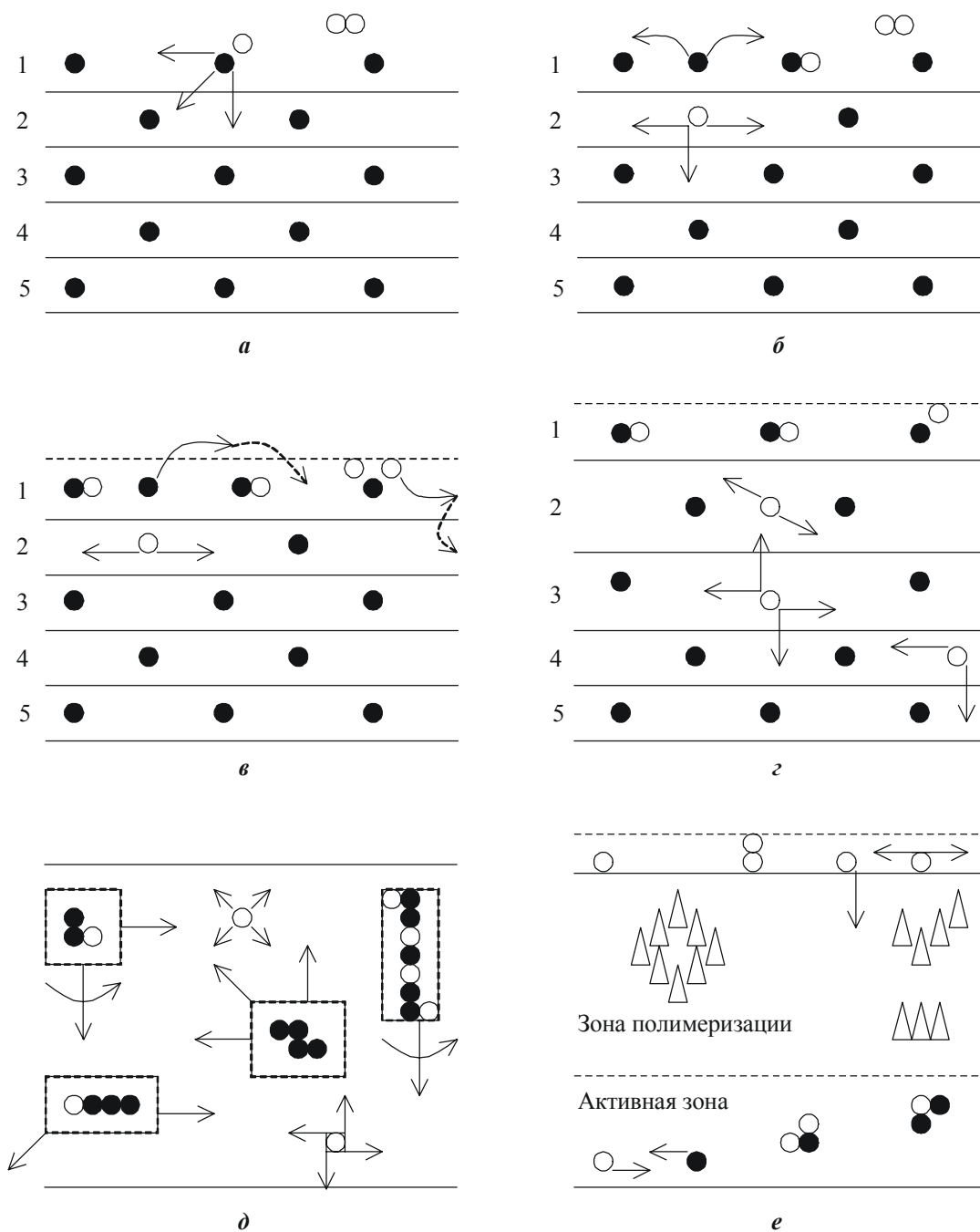


Рис.1. Стадии начального этапа окисления кремния (● – атом Si, ○ – атом O, Δ – тетраэдр SiO_4^{4-} , стрелки – возможные перемещения (или вращения) атомов или атомных кластеров; два круга на одной вертикали или горизонтали рядом – химическая связь между соответствующими атомами; 1–5 – номера слоев)

не дает гарантии квазистатичности (эффект Джоуля–Томпсона), будем исходить из такого предположения. Процессы происходят при постоянной температуре и давлении, но при переменном объеме, числе частиц, внутренней энергии (как суммы кинетической энергии атомов и, что особенно важно, потенциальной энергии взаимодействия атомов) и при поглощении теплоты хемосорбции. В рассматриваемом случае система состоит из трех компонентов: атомов Si ($N = 5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$), атомов или анионов кислорода N_O , вакансий N_v , сосуществующих в объеме $V = h\sigma$ (h – текущая толщина слоя, σ – размер

единичной площадки, например 1 см^2). Поэтому изобарно-изотермический потенциал Гиббса $\Phi = U + pV - TS$ не сохраняется [13]:

$$d\Phi(t) = \mu_O dN_O + \mu_V dN_V, \quad (1)$$

где $\mu_O, \mu_V = \text{const}$ – соответствующие химические потенциалы, зависящие только от p, T .

За время dt система поглощает теплоту $\delta Q = \gamma q dt$, где q – поток теплоты хемосорбции, проходящий через единичную площадь за единицу времени, $0 < \gamma < 1$ – числовой параметр, учитывающий диссипацию энергии. В предположении равновесности процессов имеем

$$\begin{cases} \delta Q = TdS, \\ dU = TdS - pdV + \mu_O dN_O + \mu_V dN_V. \end{cases} \quad (2)$$

Полученная теплота тратится на совершение работы $pdV = p\sigma dh$ (p – давление газовой среды, в которой проходит окисление) и на изменение внутренней энергии:

$$dU = NdE - (E_V - E)dN_V + \mu_O dN_O + \mu_V dN_V. \quad (3)$$

Последние два слагаемых сократятся при подстановке в (2). Первое слагаемое учитывает изменение потенциальной энергии E каждого атома кремния ввиду изменения длины связи Si–Si. Второе слагаемое учитывает убыль внутренней энергии всякий раз, когда образуется новая вакансия. При этом энергетические затраты (активационный барьер) $E_V = \text{const}$ ($E_V = 2,13\text{--}2,32$ эВ) на образование одной вакансии в объемном кристалле уменьшены на величину энергии E , запасенной в растянутой связи Si–Si. Очевидно, что чем более растянута эта связь, тем экспоненциально более облегчено появление вакансии.

Для простоты предположим линейную связь между относительным удлинением цепочки атомов и упругой силой:

$$G \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{F}{s}, \quad (4)$$

где G – размерный коэффициент; F – упругая сила; s – общая «площадь сечения», на которую действует сила; l_0 – длина связи Si–Si в идеальном кристалле, равная $1,3 \text{ \AA}$; Δl – приращение длины связи Si–Si.

В роли коэффициента G в (4) может выступать модуль Юнга (для кремния $G = 110\text{--}160$ ГПа). Это оправдано и по смыслу, и по размерности. Существуют квантово-химические программы (CRYSTMET, Orestes), позволяющие из первых принципов или полуэмпирическим путем, используя приближение Леннарда–Джонса для межмолекулярного взаимодействия, вычислить макроскопические характеристики вещества, в том числе модуль Юнга. При этом точно рассчитанная связь $F(\Delta l)$ заведомо нелинейная.

Работа против внешней силы определяет запасенную потенциальную энергию:

$$E = -A = \int_0^{\Delta l} |F| dx = \int_0^{\Delta l} Gs \frac{x}{l_0} dx \cong \int_0^{\Delta l} G \cdot 4\pi l_0^2 \cdot \frac{x}{l_0} dx = 2\pi G l_0 \Delta l^2. \quad (5)$$

Найдем связь $\Delta l(t)$ с текущей толщиной приповерхностного слоя $h(t)$. Будем исходить из простых геометрических рассуждений, записав для начального и конечного моментов времени:

$$\begin{cases} \beta(N + N_v(0))l_0^3 + N_O(0)\beta_O d^3 = h_0\sigma, \\ \beta(N + N_v)(l_0 + \Delta l)^3 + N_O\beta_O d^3 = h\sigma. \end{cases} \quad (6)$$

Здесь $\beta^{-1} \approx \beta_O^{-1} \cong (4\pi/3)/8 \approx 0,5$ – форм-фактор, учитывающий плотность упаковки шаров в кубическом пространстве; $d = \text{const}$ – диаметр аниона O^- ; $N_v(0)$ и $N_O(0)$ – количество вакансий и подвижного кислорода в момент $t = 0$. Размер вакансии предполагается равным размеру атома кремния. Разделив второе уравнение в (6) на первое и учитывая, что $\Delta l \ll l_0$, получим:

$$\frac{h}{h_0} \cong 1 + \frac{(N_v - N_v(0)) + (N + N_v(0)) \cdot 3\Delta l / l_0 + \beta_0 / \beta \cdot (N_O - N_O(0)) \cdot (d / l_0)^3}{N + N_v(0) + \beta_0 / \beta \cdot N_O(0) \cdot (d / l_0)^3}. \quad (7)$$

Выражение (7) можно упростить, если принять во внимание, что в $1 \text{ см}^3 N \sim 10^{23}$, $N_v(0) \sim 10^8$ [14] и N_v не больше числа вакансий при температуре плавления $\sim 10^{19}$ [3, 14], $N_O(0)$ вряд ли более чем на два порядка превышает предел растворимости кислорода в кремнии $\sim 5 \cdot 10^{18}$. Поэтому не следует ожидать увеличения толщины приповерхностного слоя более чем на 30–50%:

$$h \approx h_0(1 + 3\Delta l / l_0). \quad (8)$$

Отметим, что конечный слой SiO_2 будет иметь толщину, в 2,2 раза превосходящую толщину кремниевого прародителя.

Напишем второе уравнение в (6) более подробно с учетом (3), (5), (8):

$$Nd(2\pi Gl_0 \Delta l^2) - (E_v - 2\pi Gl_0 \Delta l^2)dN_v = \gamma q dt - p\sigma h_0 d(3\Delta l / l_0). \quad (9)$$

Проинтегрировав (9) в пределах от 0 до t , получим выражение (10), связывающее время и кортеж $\langle \Delta l, N_v, N_O \rangle$:

$$N2\pi Gl_0(\Delta l)^2 + \frac{3p\sigma h_0}{l_0}(\Delta l) + 2\pi Gl_0 \int_{N_v(0)}^{N_v(t)} (\Delta l)^2 dN_v = E_v(N_v - N_v(0)) + \gamma \int_0^t q(t) dt. \quad (10)$$

Отметим, что N_O в явном виде не входит в (10).

Оценим энтропию системы $S(N, N_O, N_v)$. Воспользуемся формулой Больцмана:

$$S = k \ln Z = k \ln \frac{(N + N_v + N_O)!}{N! N_v! N_O!}, \quad (11)$$

где Z – статистический вес; $N + N_v + N_O$ – общее число частиц в системе.

Для идеального кристалла уравнение (11) дает $S(N, 0, 0) = 0$ – общепринятое значение. Применяя формулу Стирлинга, получим

$$S / k = (N + N_v + N_O) \ln(N + N_v + N_O) - N \ln N - N_v \ln N_v - N_O \ln N_O. \quad (12)$$

Учтем, что $N_O \ll N$ и $N_v \ll N$. Тогда, пренебрегая членами второго порядка, получим

$$\begin{aligned} S / k &\approx (N_v + N_O) + N_v \ln n - N_v \ln N_v + N_O \ln N - N_O \ln N_O \approx \\ &\approx (N_O + N_v) \ln N - N_v \ln N_v - N_O \ln N_O. \end{aligned} \quad (13)$$

Запишем систему (6) в дифференциальной форме:

$$\begin{cases} kT \left[dN_v \cdot \ln \frac{N}{eN_v} + dN_o \cdot \ln \frac{N}{eN_o} \right] = \gamma q dt; \\ Nd(2\pi Gl_0 \Delta l^2) + p\sigma h_0 d(3\Delta l / l_0) - (E_v - 2\pi Gl_0 \Delta l^2) dN_v = \gamma q dt. \end{cases} \quad (14)$$

В интегральной форме система (6) имеет следующий вид:

$$\begin{cases} kT[(N_o + N_v) \ln N - N_v \ln N_v - N_o \ln N_o] = \gamma \int_0^t q(t) dt; \\ N \cdot 2\pi Gl_0 \cdot (\Delta l)^2 + \frac{3p\sigma h_0}{l_0} (\Delta l) + 2\pi Gl_0 \int_{N_v(0)}^{N_v(t)} (\Delta l)^2 dN_v = E_v(N_v - N_v(0)) + \gamma \int_0^t q(t) dt. \end{cases} \quad (15)$$

Таким образом, на два уравнения имеем три неизвестных в кортеже $\langle \Delta l, N_v, N_o \rangle$ и неопределенную пока функцию $q(t)$. Термодинамического анализа явно недостаточно, и система (15) должна быть дополнена кинетическими уравнениями, а именно:

$$\frac{dN_o^*}{dt} = \alpha_1(N^* - N_o^*)p - \alpha_2 N_o^* - (N_o^* - N_o l_0 / h_0) \frac{D}{h^2}, \quad (16)$$

$$\frac{dN_o}{dt} = (N_o^* - N_o l_0 / h_0) \frac{D}{h^2}, \quad (17)$$

$$q(t) = \varepsilon \alpha_1 (N^* - N_o^*) p. \quad (18)$$

Здесь $N^*(t)$ – количество адсорбционных центров на поверхности кремния; N_o^* – количество хемосорбированных атомов кислорода на поверхности; D – коэффициент диффузии кислорода в приповерхностном слое; α_1 [$\text{Па}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$] и α_2 [с^{-1}] – кинетические константы; ε – энергетический выход на один атом кислорода суммарной реакции хемосорбции $\frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \varepsilon$. Уравнение (16) представляет собой запись ленгмюровской адсорбции (модель Ленгмюра предполагается справедливой даже для окисления сверхтонких слоев [4, 5, 15]), где первый член, отвечающий за адсорбцию, детализирован с учетом переменного числа центров адсорбции, второй член отвечает за десорбцию, а третий – описывает ускоренную диффузию кислорода с поверхности в приповерхностный слой. При записи последнего члена для приведения размерностей объемной и поверхностной концентраций введен множитель l_0/h_0 , а величина h^2 есть знаменатель конечно-разностного аналога второй производной $\partial^2 c / \partial x^2$ в уравнении переноса. По этой же причине записывается и (17). Поток тепла $q(t)$ [Дж/с] естественным образом получаем из первого слагаемого (16).

Отметим, что число адсорбционных мест и коэффициент диффузии являются в рассматриваемой модели переменными величинами, которые в первую очередь зависят от концентрации вакансий. Связь коэффициента диффузии D и N_v полагается квадратичной (если для образования вакансии необходима реализация вероятности скачка атома из узла кристаллической решетки, то для осуществления акта диффузии необходимо по крайней мере два таких скачка):

$$D = D_0 \left(\frac{N_v}{N_v(0)} \right)^2, \quad D_0 = 0,07 \cdot \exp(-2,44 / kT) \text{ [см}^2/\text{с]}. \quad (19)$$

Связь количества центров адсорбции на поверхности и количества вакансий в приповерхностном слое менее очевидна [6]. В модели не учитывается напрямую взаимосвязь зарядовых состояний поверхности и приповерхностного слоя (можно предположить увеличение степени полярности поверхности в ходе начального этапа окисления). Эта проблема заслуживает отдельного обсуждения. Косвенно наличие вакансии в приповерхностном слое дает возможность перемещения в глубь атома Si^* (* – принадлежность атома поверхности), изменения характера связей Si–Si на поверхности, включая появление частичного положительного заряда на близлежащих атомах Si^* . Данный эффект моделируем линейной связью ($N^*(0)$ оценено как число оборванных связей на поверхности (100)–Si):

$$N^* = N^*(0) \cdot (1 + kN_v / N_v(0)),$$

$$N_v(0) = 4,6 \cdot 10^{23} \exp(-2,32 / kT) [\text{см}^{-3}], \quad N^*(0) = 6,77 \cdot 10^{14} \text{ шт.} \quad (20)$$

Сформулируем условие, при котором происходит фазовый переход. С учетом непрерывности химического потенциала при фазовых переходах предпочтительнее было бы, используя (1), записать

$$\mu = \Phi(N, N_v^{\text{кр}}, N_O^{\text{кр}}) / (N + N_O^{\text{кр}} + N_v^{\text{кр}}) = \Phi_{\text{SiO}_2} / 3N. \quad (21)$$

Однако начальные химические потенциалы μ_O и μ_v неизвестны, что затрудняет применение этого критерия. Поэтому целесообразно воспользоваться одним из равенств:

$$\Delta l / l_0 < \text{const}; \quad N_v < \text{const}; \quad N_O < \text{const} \lesssim 10^2 N_O^{\text{пр}}, \quad (22)$$

где $N_O^{\text{пр}} = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ – предельная растворимость кислорода в кремнии.

В результате термодинамического рассмотрения начального этапа окисления кремния (в предположении равновесности происходящих процессов) получена математическая модель, связывающая длительность периода индукции с напряженностью связи Si–Si, концентрацией вакансий и концентрацией растворенного кислорода в приповерхностном слое. Эта модель дополняет и расширяет предложенную ранее модель процессов полимеризации в пограничном слое при высокотемпературном окислении кремния в сухом кислороде. На качественном уровне она удовлетворительно объясняет аномально высокую скорость роста на начальном этапе окисления кремния.

Литература

1. *Зайцев Н.А., Шурчков И.О.* Структурно-примесные и электрофизические свойства системы Si–SiO₂. – М.: Радио и связь, 1993. – 192 с.
2. *Красников Г.Я., Зайцев Н.А., Матюшкин И.В.* Математическое моделирование кинетики высокотемпературного окисления кремния и структуры пограничного слоя в системе Si–SiO₂ // Физика и техника полупроводников. – 2003. – Т. 37, № 1. – С. 44–50.
3. *Ренинский С.М.* Процессы окисления полупроводников и строение границ раздела // Физика и техника полупроводников. – 2001. – Т. 35, вып. 9. – С. 1050–1062.
4. *Revecz A.G.* The defect structure of vitreous SiO₂ films on silicon: structure of vitreous SiO₂ and the nature of Si–O bond // Phys.Stat.Solidi (A). – 1999. – Vol. 57, № 1. – P. 235–244.
5. *Watanabe H. et al.* Kinetics of initial layer-by-layer oxidation of Si (001) surfaces // Phys. Rev. Lett. – 1998. – Vol. 80, № 2. – P. 345–348.
6. *Hoshino T., Nishioka Y.* Molecular adsorption and dissociative reaction of oxygen on the Si (111) 7×7 surface // Phys. Rev. B. – 2000. – Vol. 61, № 7. – P. 4705–4713.

7. **Волькенштейн Ф.Ф.** Физико-химия поверхности полупроводников. – М.: Наука, 1973. – 400 с.
8. **Sakata K. et al.** Quantum chemical mechanism of oxidation of the hydrogen-terminated Si-surface by oxygen anion // Appl. Surf. Sci. – 2000. – Vol. 159–160. – P. 392–397.
9. **Hoshino T., Nishioka Y.** Inward diffusion of oxygen on a silicon surface // Phys. Rev. Lett. – 2000. – Vol. 84, № 20. – P. 4633–4636.
10. **Nakamura K., Kurokawa A., Ichimura S.** Initial oxidation of Si(100) 2×1 by ozone: transition of growth kinetics from adsorption to ultrathin film growth // Jap. J. Appl. Phys. Pt2: Letters. – 2000. – Vol. 39, № 4B. – P. L357–L359.
11. **Барре П.** Кинетика гетерогенных процессов: Пер. с фр. / *Под ред. В.В. Болдырева.* – М.: Мир, 1976. – 400 с.
12. **Ашкрофт Н., Мерлин Н.** Физика твердого тела: Пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – Т. 1. – 399 с.
13. **Ансельм А.И.** Основы статистической физики и термодинамики. – М.: Наука, 1973. – 424 с.
14. **Гегузин Я.Е., Кагановский Ю.С.** Диффузионные процессы на поверхности кристалла. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 312 с.
15. **Косолюбов С.С., Асеев А.Л., Латышев А.В.** In situ исследование взаимодействия кислорода с поверхностью кремния (111) методом сверхвысоковакуумной отражательной электронной микроскопии // Физика и техника полупроводников. – 2001. – Т. 35, № 9. – С. 1084–1091.

Зайцев Николай Алексеевич – доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник физико-технического центра АОО «НИИМЭ и завод Микрон» (г. Москва).
Область научных интересов: физика и технология кремниевых микросхем.

Матюшкин Игорь Валерьевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник физико-технического центра АОО «НИИМЭ и завод Микрон» (г. Москва).
Область научных интересов: математическое моделирование технологических процессов.

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.315.592

Влияние металла на поверхностные электронные состояния кремния в слоистой системе $Me-Ga_2Se_3-(SiO_x)Si$

Н.Н.Безрядин, В.В.Асessorов, С.В.Сизов, Е.А.Михайлюк, Ю.В.Сыноров, Т.А.Кузьменко

Воронежская государственная технологическая академия

В.Н.Пахомов

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Методом высокочастотных вольт-фарадных характеристик исследованы полевые гетероструктуры $Me-Ga_2Se_3-(SiO_x)Si$ с металлическими контактами из Al, Ni, Mg и Pt. Установлено, что увеличение термодинамической работы выхода металла контакта приводит к повышению вероятности туннельного обмена носителями заряда между областью пространственного заряда в Si и локализованными состояниями в слое Ga_2Se_3 . Этот эффект проявляется на вольт-фарадной характеристике гетероструктуры $Pt-Ga_2Se_3-(SiO_x)Si$ в виде пологого участка, характерного для поверхностных электронных состояний в Si.

Высокий уровень развития технологии кремниевых интегральных схем обуславливает интерес к полевым гетероструктурам на основе кремния. Одним из путей решения задачи повышения быстродействия твердотельных элементов на основе этого материала является использование новых материалов в качестве подзатворного диэлектрика, например слоев широкозонных полупроводников при толщинах, много меньших дебаевской длины экранирования [1]. В работах [1, 2] показано, что для полевых гетероструктур на основе кремния требованиям, предъявляемым к материалу подзатворного полупроводникового слоя, удовлетворяет соединение со стехиометрическими вакансиями Ga_2Se_3 . Для формирования монокристаллических пленок Ga_2Se_3 разработан способ напыления в квазизамкнутом объеме (КЗО) из независимых источников галлия и селена [3]. Хорошее соответствие параметров кристаллических решеток селенида галлия и кремния (0,543 нм и 0,541 нм соответственно) обеспечивает в этом гетеропереходе границу раздела с низкой плотностью дефектов. Это проявляется в относительно низких значениях плотности поверхностных электронных состояний (ПЭС) (менее $10^{11} \text{ см}^{-2}/\text{эВ}$) на границе раздела Ga_2Se_3-Si в гетероструктурах Al- Ga_2Se_3-Si (*n*-, *p*-типа) [2]. В этой же работе отмечается, что характер спектра ПЭС подобен известному для границы раздела термическая двуокись кремния-кремний. Предложено объяснение восстановления предварительно (непосредственно перед напылением Ga_2Se_3 в камере КЗО)

© Н.Н.Безрядин, В.В.Асessorов, С.В.Сизов, Е.А.Михайлюк, Ю.В.Сыноров, Т.А.Кузьменко, В.Н.Пахомов, 2006

удаленного с поверхности Si подложки естественного оксида (SiO_x) за счет диффузии растворенного в кремнии кислорода к межфазной границе раздела. В результате гетероструктура представляет собой четырехслойную композицию типа $\text{Me-Ga}_2\text{Se}_3\text{-(SiO}_x\text{)Si}$. Этот же механизм лежит в основе радиационно-стимулированного дефектообразования в системе $\text{Ga}_2\text{Se}_3\text{-Si}$ и обуславливает повышенную радиационную стойкость полевых гетероструктур $\text{Al-Ga}_2\text{Se}_3\text{-(SiO}_x\text{)Si}$ [4].

Во всех отмеченных выше работах в качестве металла контакта использовался алюминий. В результате исследований вольт-амперных (ВАХ) и вольт-фарядных характеристик (C - V -характеристик) в работе [1] установлено, что по электрическим характеристикам контакт $\text{Al-Ga}_2\text{Se}_3$ близок к нейтральному, а в случае поликристаллических пленок Ga_2Se_3 обеспечивает инжекцию электронов в слой и протекание в гетероструктуре токов, ограниченных пространственным зарядом. В то же время для выполнения этим слоем функций подзатворного диэлектрика необходимо снижение уровня сквозных токов, что достигается использованием контакта с отличной от Al термодинамической работой выхода χ_{Me} . Учитывая, что в пленках Ga_2Se_3 – полупроводнике со стехиометрическими вакансиями – возможно существование состояния с собственной проводимостью, варьировать значения χ_{Me} необходимо как в сторону увеличения, так и уменьшения по сравнению с термодинамической работой выхода алюминия.

В настоящей работе исследованы высокочастотные (ВЧ) C - V -характеристики гетероструктур на основе системы $\text{Ga}_2\text{Se}_3\text{-(SiO}_x\text{)Si}$ с различными металлами в качестве полевого электрода. Измерения ВЧ C - V -характеристик проводились с помощью аппаратуры, описанной в [5]. Для выбора металлов контакта изучались ВЧ (частота тестового сигнала 10^5 Гц) C - V -характеристики МДП-структур $\text{Me-SiO}_2\text{-Si}$, изготовленных на основе термически окисленного кремния в сухом кислороде в технологических условиях, отвечающих требованиям производства интегральных схем. Металлы напылялись термическим открытым испарением в вакууме (10^{-4} Па) на установке ВУП-5 на одну пластинку с однородным по толщине и зарядовому состоянию окислом. Подложки при напылении специально не подогревались. По разности напряжений в точках «плоских зон» между ВЧ C - V -характеристиками МДП-структур с контактами из Mg, Sn, In, Al, Ni, Ag, Au и ВЧ C - V -характеристиками структуры Pt-SiO₂-Si были оценены значения термодинамических работ выхода всех металлических пленок, получаемых в данных экспериментах в предположении, что $\chi_{\text{Pt}} = 5,3$ эВ [6]. Значения χ_{Me} для приведенного ряда металлов составили соответственно 3,5; 4,1; 4,1; 4,2; 4,5; 4,5; 4,6 эВ, что удовлетворительно коррелирует с известными табличными значениями [6]. Согласно поставленным задачам исследования гетероструктур $\text{Me-Ga}_2\text{Se}_3\text{-(SiO}_x\text{)Si}$ (n -, p -типа) в качестве контактов использовались Mg(3,5 эВ), Al(4,2 эВ), Ni(4,5 эВ) и Pt(5,3 эВ).

Пленки Ga_2Se_3 толщиной 10,0–150,0 нм напылялись в КЗО из независимых источников Ga и Se по методике, описанной в [3]. Si-подложки отмывались по стандартной технологии, используемой в производстве Si СБИС. При формировании металлических контактов через маску с площадью окон $\sim 0,3$ мм² подложки не подогревались. Толщина пленок селенида галлия оценивалась по емкости гетероструктур при напряжениях, соответствующих обогащению основными носителями заряда в кремниевой подложке. Относительная диэлектрическая проницаемость пленок Ga_2Se_3 ($\sim 9,9$) известна (проведены эллипсометрические измерения и изучались поперечные изломы образцов в расстровом электронном микроскопе [1, 3]).

ВЧ C - V -характеристики гетероструктур $\text{Me-Ga}_2\text{Se}_3\text{-(SiO}_x\text{)Si}$ (n -типа) с контактами из Mg и Ni оказались подобны характеристикам с контактом из Al. Наблюдался только

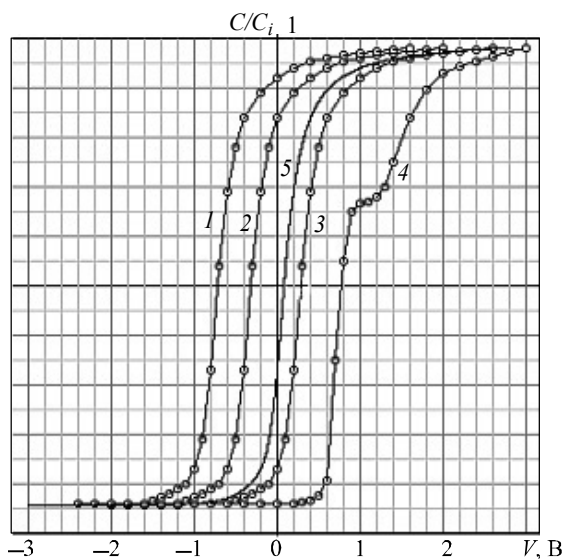


Рис.1. Экспериментальные ВЧ $C-V$ -характеристики гетероструктуры $Me-Ga_2Se_3-(SiO_x)Si$ с различными металлическими контактами (1 – Mg; 2 – Al; 3 – Ni; 4 – Pt) и теоретическая зависимость $C(V)$ (кривая 5) для МДП-структуры с толщиной слоя диэлектрика Д, электростатически эквивалентной композиции $Ga_2Se_3-(SiO_x)$ (толщина слоя $Ga_2Se_3 - 30$ нм)

сдвиг между зависимостями $C(V)$ по напряжению, соответствующий термодинамической работе выхода используемых металлов (рис.1, кривые 1, 2, 3). Для структур с контактом из Pt кроме сдвига по напряжению на ВЧ $C-V$ -характеристике появлялась полочка, характерная для ПЭС в Si (рис.1, кривая 4). Как и в работах [1, 2], ВЧ зависимости $C(V)$ данных структур с контактом из Al с учетом разности работ выхода Al и Si совпадают с соответствующей теоретической зависимостью $C(V)$, рассчитанной для идеальной МДП-структуры (рис.1, кривая 5). Как уже отмечалось, это характерно и для ВЧ $C-V$ -характеристик гетероструктур с контактами из Mg и Ni. Эти факты говорят о сравнительно низкой концентрации ПЭС в Si под слоем Ga_2Se_3 . Поскольку контакты из Pt напылялись на те же самые подложки $Ga_2Se_3-(SiO_x)Si$, что и Al, Mg, Ni, а подложка при этом специально не подогревалась,

связать появление полочки на $C-V$ -характеристике (рис.1, кривая 4) можно только с влиянием термодинамической работы выхода Pt-контакта.

Для объяснения предположения о влиянии работы выхода металла на поведение $C-V$ -характеристик исследуемых гетероструктур был проведен расчет теоретических зависимостей $C(V)$ для МП'ДП-систем при варьировании величины χ_{Me} и параметров центров локализации заряда (ЦЛЗ) в слое П' у границы с диэлектриком (Д). Для этого решалось уравнение Пуассона последовательно для слоев П', Д и области пространственного заряда (ОПЗ) в слое П. Кроме ВЧ $C-V$ -характеристик в результате расчетов получены энергетические диаграммы гетероструктур.

Для расчетов необходимо знать величину электронного сродства в каждом из используемых металлов и полупроводников МП'ДП-системы. Эта величина известна для всех металлов и Si [6]. Для формируемых пленок селенида галлия этот параметр находился в результате исследования токов внутренней фотоэмиссии в гетеропереходе $Ga_2Se_3-(SiO_x)Si$ с полупрозрачными контактами из Ni. Измерение тока проводилось с помощью электрометрического усилителя типа ИТН-6.

Фототок при комнатной температуре наблюдался только при положительном потенциале на Ni-контакте в гетероструктурах, сформированных на основе кремния p -типа ($\rho \sim 10-40$ Ом·см). Отсутствие фотопроводимости в других типах гетероструктур с селенидом галлия на Si (n^- , p^- , n^+ , p^+ -типа) при отрицательном потенциале на Ni-контакте обусловлено низкой фоточувствительностью самого слоя Ga_2Se_3 , а на Si (n^- , n^+ , p^+ -типа) при положительном потенциале на Ni-контакте к селениду галлия – высоким уровнем темнового тока в гетероструктуре (скорость фотогенерации в кремнии у контакта с Ga_2Se_3 ниже скорости термополевой эмиссии электронов в селенид галлия при комнатной температуре). Присутствие включенной последовательно со слоем Ga_2Se_3 обедненной ОПЗ в Si (p -типа) обеспечивает необходимое для наблюдения фотоэмиссии электронов из Si в Ga_2Se_3 снижение уровня темнового тока при положительном потенциале на Ni-контакте.

В зависимости от величины внешнего приложенного к структуре напряжения фототок появлялся при энергиях квантов света $\sim 1,75\text{--}1,8$ эВ. Эти значения энергии на $0,1\text{--}0,2$ эВ меньше оптической ширины запрещенной зоны селенида галлия. Этот факт также свидетельствовал о наблюдении в проводимых экспериментах фотоэмиссии из кремния в Ga_2Se_3 .

Основным условием корректного измерения фотоинжекционного тока является постоянство уровня фотогенерации носителей в эмиттере – кремнии во всем рассматриваемом диапазоне энергий квантов света $h\nu$. Это обеспечивалось поддержанием дифференциальной емкости освещенной структуры на одном уровне во всем диапазоне значений $h\nu$. Емкость регистрировалась при положительном потенциале на Ni-электроде, когда приповерхностная область ОПЗ в Si p -типа находилась в состоянии инверсии, и ее емкость в диапазоне частот тестового измерительного сигнала $10^2\text{--}10^4$ Гц определялась темпом генерации неосновных носителей заряда – электронов.

Полученные зависимости фотоинжекционного тока I_ϕ от энергии квантов хорошо описываются законом фотоэмиссии Фаулера [7, 8] $I_\phi \sim (h\nu - \Phi)^2$, где Φ – высота потенциального барьера. Значение Φ , определяемое по точке пересечения прямой в координатах $I_\phi^{1/2}$ от $h\nu$ с осью энергии, изменяется от 1,79 до 1,76 эВ при увеличении внешнего приложенного напряжения от 10^{-2} до 0,3 В (рис.2, прямые 1–4). Это объясняется понижением потенциального барьера внешним электрическим полем. При этом инжекционный ток с учетом зависимости потенциального барьера от внешнего напряжения может быть представлен в виде [9, 10] $I_\phi \sim (h\nu - \Phi + \Delta\Phi)^2$, где $\Delta\Phi = kT\beta_{\text{ш}}V^{1/2}$, а $\beta_{\text{ш}}$ соответствует определенному ранее коэффициенту наклона темновой ВАХ (в координатах $\lg I$ от $V^{1/2}$) при реализации в гетероструктуре механизма токопрохождения Шотки [1]. Экстраполяция зависимости Φ от $V^{1/2}$ к значению $V = 0$ дает невозмущенную внешним электрическим полем величину потенциального барьера $\Phi_0 = 1,81$ эВ (рис.2, вставка). Это позволяет заключить, что наблюдаемый в данных исследованиях фототок обусловлен фотоэмиссией электронов из валентной зоны Si p -типа в зону проводимости Ga_2Se_3 . Тогда, учитывая, что ширина запрещенной зоны Si при комнатной температуре составляет 1,11 эВ, разрыв в энергии дна зоны проводимости на границе $\text{Ga}_2\text{Se}_3\text{--}(\text{SiO}_x)\text{Si}$ составит $\sim 0,7$ эВ, а потолка валентной зоны $\sim 0,14$ эВ (ширина запрещенной зоны $\text{Ga}_2\text{Se}_3 \sim 1,95$ эВ [10]). Соответственно электронное сродство в Ga_2Se_3 должно быть на 0,7 эВ меньше, чем в Si (4,01 эВ [6]), т.е. $\sim 3,31$ эВ. Это значение и использовалось в расчетах.

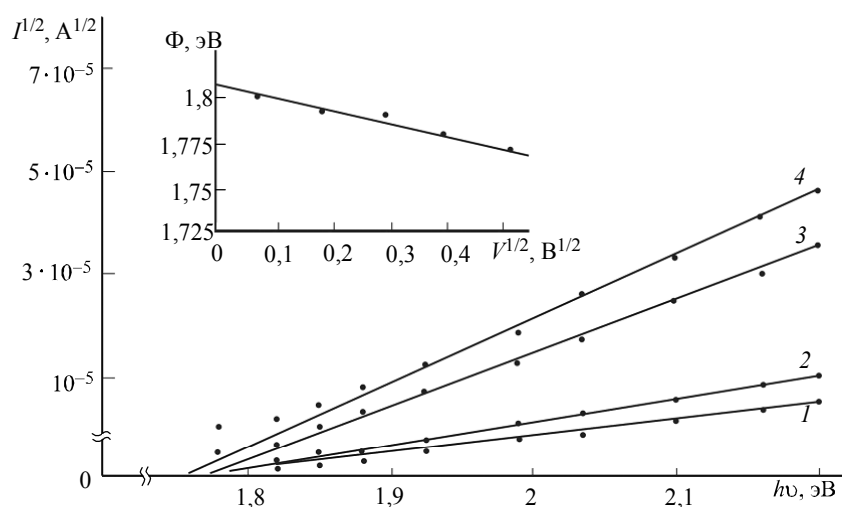


Рис.2. Зависимости фотоэмиссионного тока от энергии квантов света и высоты барьера от внешнего напряжения (вставка) в гетероструктуре Ni– $\text{Ga}_2\text{Se}_3\text{--}(\text{SiO}_x)\text{--Si}$ (p -типа) ($V = 10^{-2}; 5 \cdot 10^{-2}; 2 \cdot 10^{-2}; 10^{-1}$ В кривые 1; 2; 3; 4 соответственно; знак V по Ni-контакту; $T = 300$ К, толщина слоя $\text{Ga}_2\text{Se}_3 - 30$ нм)

Из анализа полученных теоретических $C-V$ -характеристик МП'ДП-структур с различными типами ЦЛЗ и значениями χ_{Me} следует, что ВЧ вольт-фарадная характеристика за счет перераспределения зарядов только в слое П' не может быть более пологой, чем ВЧ-зависимость $C(V)$ для идеальной МДП-структуры с толщиной слоя Д, электростатически эквивалентной композиции П'Д. В то же время именно этот эффект наблюдается в экспериментах в гетероструктуре Pt-Ga₂Se₃-(SiO_x)Si (см. рис.1). Объяснить такое поведение зависимостей $C(V)$ можно наличием ПЭС в Si-подложке. Однако ПЭС отсутствуют (концентрация их ниже уровня чувствительности ВЧ $C-V$ -метода), поскольку они должны были бы проявляться и в случае других контактов к изучаемой системе Ga₂Se₃-(SiO_x)Si.

Из рассчитанных энергетических диаграмм гетероструктур следует, что в зависимости от величины контактной разности потенциалов МП' ЦЛЗ на границе П'Д оказывается в различных зарядовых состояниях при одинаковых значениях поверхностного потенциала в полупроводнике П (Si) (рис.3). Это обеспечивает, соответственно, различную вероятность туннельного обмена зарядом между ОПЗ в слое П (Si) и этими состояниями через тонкий (менее 3,0 нм) подслоя естественного оксида SiO_x. В этом случае для описания адмиттанса гетероструктуры справедлива модель, основанная на туннельной перезарядке приграничных состояний [9].

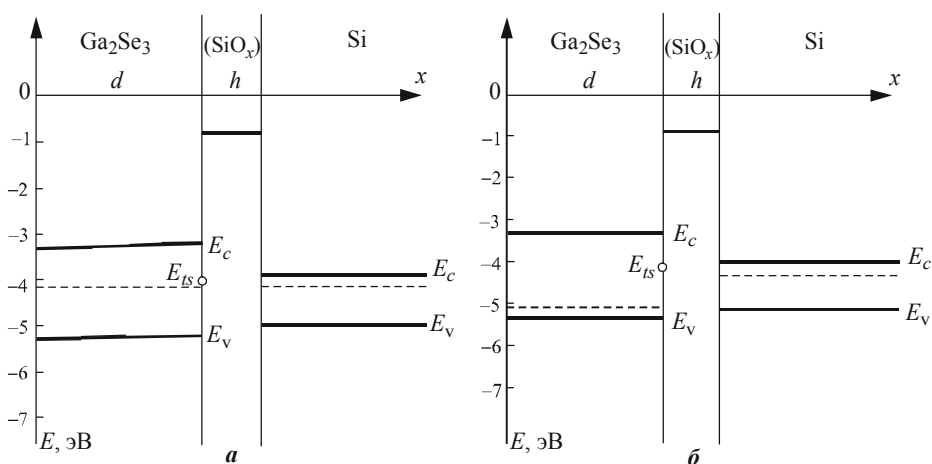


Рис.3. Рассчитанные энергетические диаграммы гетероструктуры $Me-Ga_2Se_3-(SiO_x)Si$ (n -типа) с контактом из Al (а), Pt (б) при значении поверхностного потенциала в Si равно нулю (концентрация электронов в Ga₂Se₃ – 10^5 см⁻³; глубина залегания ЦЛЗ акцепторного типа $E_{IS} \sim 0,8$ эВ, концентрация ЦЛЗ $\sim 10^{12}$ см⁻², толщина слоя Ga₂Se₃ составляет 30 нм, h – толщина слоя SiO_x, x – координата в поперечном направлении гетероструктуры)

В зависимости от термодинамической работы выхода металла диапазон внешнего напряжения, в котором уровень дна зоны проводимости в полупроводнике П (Si) и энергетический уровень ЦЛЗ на границе раздела П'Д (Ga₂Se₃-(SiO_x)) совпадают, соответствует различным значениям поверхностного потенциала в слое П (Si) (см. рис.3). В структуре с контактом из Pt это совпадение происходит в диапазоне внешних напряжений, соответствующих обеднению и началу обогащения у поверхности П (Si), а в случае контакта из Al смещается в область напряжений, соответствующих состоянию сильного обогащения в П (Si). Это объясняет особенности $C-V$ -характеристик гетероструктур $Me-Ga_2Se_3-(SiO_x)Si$ n -типа с контактом из платины в сравнении с другими используемыми в работе контактами (Al, Ni, Mg). Такое поведение характеристик наблюдается во всем рассматриваемом диапазоне толщин пленок Ga₂Se₃, (10,0–150,0 нм):

ВЧ $C-V$ -характеристики гетероструктур $Me-Ga_2Se_3-(SiO_x)Si$ на кремнии n -типа с металлами из Al, Ni, Mg по наклону совпадают с теоретическими для идеальной МДП-структуры (см. рис.1, кривые 1, 2, 3 и 5). В рамках модели, рассмотренной в работе [8], это объясняется анизотипностью МП'ДП-структуры, т.е. пленки Ga_2Se_3 (Π') проявляют p -тип электропроводности в системах на основе Si n -типа и свидетельствует о малости толщины пленок по сравнению с дебаевской длиной экранирования. Характерная полочка на $C-V$ -характеристиках этих систем с контактом из Pt сохраняется также во всем диапазоне толщин пленок селенида галлия в гетероструктурах на основе Si n -типа (рис.1, кривая 4).

В отличие от ВЧ $C-V$ -характеристик на основе Si n -типа, экспериментальные ВЧ-зависимости $C(V)$ этих же систем с контактом из платины, но на основе Si p -типа хорошо описываются в рамках идеализированной модели МП'ДП-структуры: при толщинах пленок Ga_2Se_3 менее 20,0 нм они по наклону соответствуют $C-V$ -характеристикам идеальной МДП-структуры, а с увеличением толщины слоя Ga_2Se_3 имеют бóльшую крутизну, чем соответствующие зависимости для идеальной МДП-структуры; нет пологих участков, характерных для ПЭС, участвующих в экранировании внешнего электрического поля (рис.4).

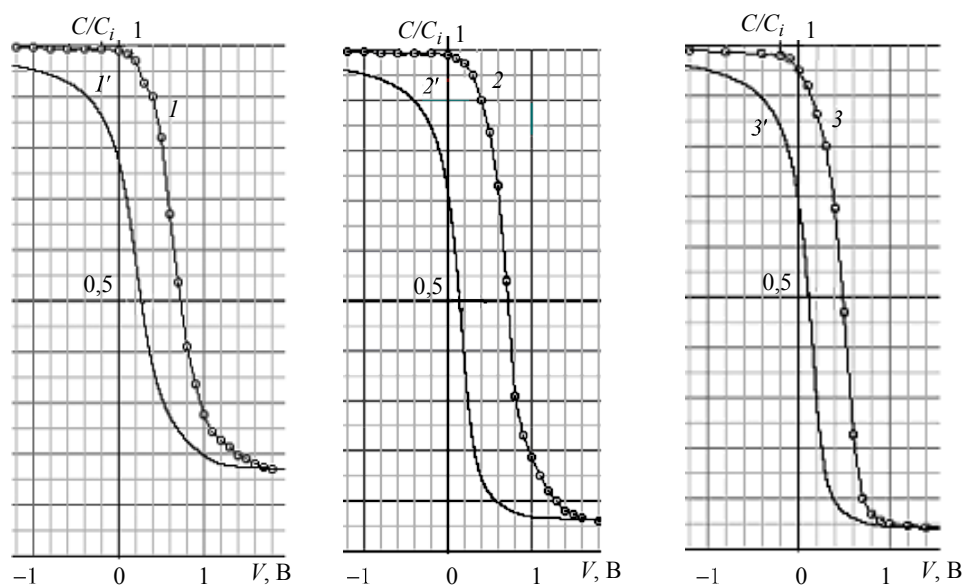


Рис.4. Экспериментальные (1–3) ВЧ $C-V$ -характеристики гетероструктуры Pt– $Ga_2Se_3-(SiO_x)Si$ p -типа и теоретические (1'–3') зависимости $C(V)$ для МДП-структуры с толщиной слоя диэлектрика, электростатически эквивалентной композиции $Ga_2Se_3-(SiO_x)$. (Толщина слоя Ga_2Se_3 – 50 нм (1, 1'), 40 нм (2, 2') и 30 нм (3, 3'))

Проведенный численный расчет ВЧ $C-V$ -характеристик МП'ДП (p -типа) слоистых систем с параметрами ЦЛЗ, определенными для структур на основе Si n -типа, свидетельствует об изменении зарядового состояния центров, обуславливающих появление ПЭС в структурах на Si n -типа по туннельному механизму. Эти центры не должны скапливаться в системах на основе Si p -типа, поскольку во всем диапазоне внешнего напряжения уровень дна зоны проводимости в Π (Si) и уровень, соответствующий энергии ЦЛЗ, не совпадают. Это значительно снижает вероятность туннельного обмена носителями заряда между Si (Π) и Ga_2Se_3 (Π'), как это происходило в структурах на основе Si n -типа. В итоге становится принципиально возможным использование гетероструктур типа $Me-Ga_2Se_3-(SiO_x)Si$ на основе Si p -типа в качестве полевых с инверсионным каналом n -типа, когда влияние ПЭС сведено к минимуму.

Таким образом, в работе показано, что:

- проявление ПЭС в Si в гетероструктурах Pt–Ga₂Se₃–(SiO_x)Si *n*-типа основано на туннельном обмене зарядом между ОПЗ в Si и центрами локализации заряда в пленке Ga₂Se₃ на границе раздела с (SiO_x);

- для снижения эффектов, проявляющихся как ПЭС в Si и связанных с туннельным обменом свободных зарядов из Si с центрами локализации заряда в Ga₂Se₃, в полевых гетероструктурах типа Ga₂Se₃–(SiO_x)Si на основе Si *n*-типа можно использовать в качестве материала подзатворного слоя металлы с термодинамической работой выхода, близкой к χ_{Al} (поликремний *n*⁺-типа), а для структур на основе Si *p*-типа – к χ_{Pt} (поликремний *p*⁺-типа);

- относительно высокое значение разрыва энергии дна зоны проводимости на границе раздела Ga₂Se₃–Si (~ 0,7 эВ) обеспечивает возможность использования этого гетероперехода только для *n*-канальных полевых элементов микроэлектроники, в отличие от гетероструктур на основе системы Ga₂Se₃–(SiO_x)Si, в которых потенциальный барьер для дырок из кремния усиливается подслоем оксида кремния.

Литература

1. *Sysoev B.I., Bezryadin N.N., Synorov Yu.V., Agapov B.L.* Investigation of gallium selenide films, grown by the hot wall method on silicon substrates // Phys. Stat. Sol. (a). – 1986. – Vol. 94, № 2. – P. K129–K132.
2. Электронные состояния на границе раздела кремний–селенид галлия / *Н.Н.Безрядин, А.С.Дронов, Т.А.Кузьменко* // Микроэлектроника. – 1998. – Т. 27, № 5. – С. 353–356.
3. *Сысоев Б.И., Безрядин Н.Н., Сыноров В.Ф., Кузьменко Т.А.* Получение и структура пленок селенида галлия на кремнии // Изв.АН СССР, сер. Неорг. материалы. – 1991. – Т. 27, № 3. – С. 470–473.
4. Устойчивость к облучению γ -квантами полевых гетероструктур типа МДП на основе кремния / *Н.Н.Безрядин, Т.А.Кузьменко, С.В.Сизов* // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2004. – Т. 6, № 1. – С. 5–8.
5. *Сысоев Б.И., Линник В.Д., Титов С.А., Стрелец М.М.* Автоматизированный измеритель вольт-фарадных характеристик на базе ЭВМ «Электроника-60» // ПТЭ. – 1988. – № 1. – С. 67–71.
6. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов: в 2-х книгах. Кн. 1 – М.: Мир, 1984. – 456 с.
7. *Preier H.* Contributions of surface states to MOS impedance // Appl. Phys. Lett. – 1967. – Vol. 10, № 11. – P. 361–364.
8. *Сысоев Б.И., Лихолет А.Н., Сыноров В.Ф., Ровинский А.П.* Об управлении зарядом в структурах типа металл – диэлектрик – полупроводник // Микроэлектроника. – 1977. – Т. 6, № 5. – С. 454–457.
9. *Berglung C.N., Powell R.T.* Photoinjection into SiO₂: Electron Scattering in the Image Force Potential Well // J.Appl. Phys. – 1971. – Vol. 42, № 2. – P. 573–579.
10. Полупроводниковые халькогениды и сплавы на их основе / *Н.Г.Абрикосов, В.Ф.Банкина, Л.В.Порецкая.* – М.: Наука, 1975. – 220 с.

Безрядин Николай Николаевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики ВГТА. *Область научных интересов:* полупроводниковые пленки и гетероструктуры – получение, кристаллическая структура, электрофизические и оптические свойства.

Асесоров Валерий Викторович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник НИИЭТ. *Область научных интересов:* физика и технология СВЧ-транзисторов.

Сизов Сергей Викторович – аспирант кафедры физики ВГТА. *Область научных интересов:* полупроводниковые пленки и гетероструктуры.

Михайлюк Екатерина Андреевна – аспирант кафедры физики ВГТА. *Область научных интересов:* полупроводниковые пленки и гетероструктуры.

Сынов Юрий Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики ВГТА. *Область научных интересов:* полупроводниковые пленки и гетероструктуры.

Кузьменко Татьяна Алексеевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики ВГТА. *Область научных интересов:* полупроводниковые пленки и гетероструктуры.

Пахомов Владимир Николаевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией кафедры МПТЭ МИЭТ. *Область научных интересов:* полупроводниковые пленки и гетероструктуры.



Десятая международная научная конференция и молодежная школа-семинар «Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники» ПЭМ – 2006

24–29 сентября 2006 г. состоится *Десятая международная научная конференция и молодежная школа-семинар «Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники» ПЭМ – 2006*. Конференция проводится в пансионате «Голубая даль» известного приморского климатического курорта Геленджик Краснодарского края.

Организаторы и спонсоры: Министерство образования и науки РФ; Государственный комитет по науке и технологиям Белоруссии; Российская академия наук; Южный научный центр РАН; Таганрогский государственный радиотехнический университет; Московский государственный институт электронной техники (технический университет); Фирма «LIMO» (Германия) и др.

Тематика секций: материалы электронной техники; микро- и наносистемная техника; микросхемотехника; наноэлектроника; оптоэлектроника; проектирование приборов и микросхем; системы на кристалле; твердотельная электроника СВЧ; технология микро- и наноэлектроники.

Адрес оргкомитета: 347928, Россия, Ростовская обл., г. Таганрог, ГСП-17А, пер. Некрасовский, 44, ТРТУ, ФЭП.

Тел.: (8634) 371767, 311584

E-mail: pem@fep.tsure.ru

Информация о представлении докладов и условиях участия в конференции размещена в Интернете: www.fep.tsure.ru/russian/conferenc/pem/conf.htm

Исследование токораспределения в биполярных транзисторах электрофлуктуационным методом

А.А.Широков, В.А.Сергеев

Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники РАН

О.А.Дулов

Ульяновский государственный технический университет

На основе анализа двухкомпонентной шумовой модели биполярного транзистора показана возможность оценки неоднородности токораспределения в транзисторной структуре по результатам измерения НЧ-шума. По экспериментальным шумовым характеристикам серийно выпускаемых транзисторов рассчитаны зависимости коэффициента распределения эмиттерного тока между центральной и периферийной областями эмиттера от полного тока. Закономерности и особенности указанных зависимостей обсуждаются и объясняются в рамках известных моделей токораспределения.

Известно, что в биполярных транзисторах (БТ) средней и большой мощности распределение плотности эмиттерного тока по площади эмиттера всегда неоднородно [1–3]. При увеличении плотности мощности неоднородность токораспределения приводит к появлению в приборных структурах локальных перегревов и ряда других физических процессов, ухудшающих функциональные характеристики и снижающих надежность приборов, вплоть до разрушения структуры [1, 4, 5]. Одной из причин неоднородного токораспределения является эффект отеснения тока к краям эмиттера вследствие падения напряжения на сопротивлении активной базы при протекании базового тока [1, 2]. В гребенчатых структурах БТ другой причиной неоднородного токораспределения является падение напряжения на сопротивлении эмиттерных дорожек металлизации, в результате чего плотность эмиттерного тока монотонно уменьшается от начала к концу дорожки [2, 3, 6]. Влияние указанных причин неоднородного токораспределения достаточно хорошо изучено и оптимизируется конструктивно-технологическими методами [2, 7].

Менее предсказуемыми и трудно контролируемыми являются причины случайного характера, которые также приводят к локализации тока и локальным перегревам в пределах малых областей структуры. Основные из них – это неоднородность толщины диффузионных слоев и переходных сопротивлений омических контактов эмиттера и базы; дефекты в области p – n -переходов (дислокации, скопления примесей) и ряд других [1, 4].

В связи с этим важной задачей является разработка косвенных методов исследования закономерностей и оценки неоднородности токораспределения в структурах мощных БТ. В настоящей работе для решения этой задачи в качестве информативного параметра предлагается использовать НЧ-шум.

Основные соотношения. В [8] предложена двухкомпонентная эквивалентная шумовая схема БТ, учитывающая перераспределение тока между активной (центральной) и пассивной (периферийной) областями транзисторной структуры. На основе анализа

этой схемы в диапазоне НЧ-шумов получено выражение для среднеквадратичного значения шумового напряжения, приведенного к входу БТ:

$$\bar{U}_{ш}^2 = (A + CR_{\Gamma}^2)\bar{i}_{\phi,п}^2 + (B + DR_{\Gamma}^2)\bar{i}_{\phi,а}^2, \quad (1)$$

где $A = \frac{r_{\phi,п}^2 [r_{\phi,а} + r_{\Delta,а}(\beta + 1)]^2}{[r_{\phi,п} + r_{\phi,а} + (r_{\Delta,п} + r_{\Delta,а})(\beta + 1)]^2}$, $B = \frac{r_{\phi,а}^2 [r_{\phi,п} + r_{\Delta,п}(\beta + 1)]^2}{[r_{\phi,п} + r_{\phi,а} + (r_{\Delta,п} + r_{\Delta,а})(\beta + 1)]^2}$,
 $C = \frac{(r_{\phi,п} + r_{\phi,а} + r_{\Delta,а})^2}{[r_{\phi,п} + r_{\phi,а} + r_{\Delta,а} + r_{\Delta,п}(\beta + 1)]^2}$, $D = \frac{(r_{\phi,п} + r_{\phi,а} + r_{\Delta,а})^2}{[r_{\phi,п} + r_{\phi,а} + r_{\Delta,п} + r_{\Delta,а}(\beta + 1)]^2}$, $\bar{i}_{\phi,п}^2$, $\bar{i}_{\phi,а}^2$ – генераторы фликкер-шума (шумового тока), локализованные в пассивной и активной областях эмиттерного перехода соответственно; $r_{\phi,п}$, $r_{\phi,а}$ – омические сопротивления пассивной и активной базы соответственно; $r_{\Delta,п}$, $r_{\Delta,а}$ – дифференциальное сопротивление пассивной (периферийной) и активной (центральной) областей эмиттерного перехода соответственно; β – коэффициент передачи по току в схеме с общим эмиттером; R_{Γ} – сопротивление генератора (источника сигнала). Величины $r_{\Delta,п}$, $r_{\Delta,а}$, $\bar{i}_{\phi,п}^2$, $\bar{i}_{\phi,а}^2$ в (1) зависят от токов $I_{\Delta,п}$ и $I_{\Delta,а}$, протекающих через периферийную и центральную области эмиттерного p - n -перехода соответственно, которые неизвестны. Для устранения этой неопределенности введем коэффициент токораспределения $m < 1$, определяющий долю полного тока эмиттера I_{Δ} , проходящего через центральную область. В результате запишем:

$$I_{\Delta,а} = mI_{\Delta}; I_{\Delta,п} = (1 - m)I_{\Delta}; r_{\Delta,п} = r_{\Delta}/(1 - m); r_{\Delta,а} = r_{\Delta}/m; r_{\Delta} = \Phi_T/I_{\Delta}, \quad (2)$$

где $\Phi_T = kT/e$ – тепловой потенциал; k – постоянная Больцмана; T – температура активной базы; e – заряд электрона; r_{Δ} – дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода.

С учетом (2) выражения для коэффициентов A , B , C , D (1) имеет вид:

$$A = \frac{r_{\phi,п}^2 [m \cdot r_{\phi,а} + r_{\Delta}(\beta + 1)]^2 (1 - m)^2}{[(1 - m)(r_{\phi,п} + r_{\phi,а}) + r_{\Delta}(\beta + 1)]^2}, \quad B = \frac{r_{\phi,а}^2 [(1 - m)r_{\phi,п} + r_{\Delta}(\beta + 1)]^2 m^2}{[m(1 - m)(r_{\phi,п} + r_{\phi,а}) + r_{\Delta}(\beta + 1)]^2},$$

$$C = \frac{[m(r_{\phi,п} + r_{\phi,а}) + r_{\Delta}]^2}{[m(r_{\phi,п} + r_{\phi,а}) + r_{\Delta} + \frac{m}{1 - m}r_{\Delta}(\beta + 1)]^2}, \quad D = \frac{[(1 - m)(r_{\phi,п} + r_{\phi,а}) + r_{\Delta}]^2}{[(1 - m)(r_{\phi,п} + r_{\phi,а}) + r_{\Delta} + \frac{1 - m}{m}r_{\Delta}(\beta + 1)]^2}.$$

В режиме малых и средних токов с хорошим приближением выполняется условие $r_{\Delta}(\beta + 1) \gg m(1 - m)(r_{\phi,п} + r_{\phi,а})$ и выражения для коэффициентов A и B существенно упрощаются:

$$A \approx (1 - m)^2 r_{\phi,п}^2; \quad B \approx m^2 r_{\phi,а}^2. \quad (4)$$

Тогда величина среднеквадратического напряжения шума, приведенного ко входу БТ при $R_{\Gamma} \rightarrow 0$, определяется из соотношения:

$$\bar{U}_{ш0}^2 \approx (1 - m)^2 r_{\phi,п}^2 \bar{i}_{\phi,п}^2 + m^2 r_{\phi,а}^2 \bar{i}_{\phi,а}^2. \quad (5)$$

Поскольку $(1 - m)^2 r_{\phi,п}^2 \ll m^2 r_{\phi,а}^2$, то первое слагаемое в правой части (5) значительно меньше второго и для среднеквадратичного шумового напряжения получим приближенное выражение

$$\bar{U}_{ш0}^2 \approx m^2 r_{б.а}^2 \bar{i}_{э.а}^2. \quad (6)$$

Согласно (6) в режиме малых и средних токов при коротком замыкании по входу, т.е. при $R_r \rightarrow 0$, среднеквадратическое шумовое напряжение определяется генератором шумового тока, локализованным в активной области эмиттерного $p-n$ -перехода, и сопротивлением активной базы. Это, по-видимому, позволяет считать, что уровень НЧ-шума, измеренный при указанных условиях, может служить мерой совершенства активной области эмиттерного перехода и базы в задачах диагностики качества БТ. Выражение для генератора тока $\bar{i}_{э.а}^2$ согласно (5) и с учетом (2) имеет вид:

$$\bar{i}_{э.а}^2 = Km^2 I_э^2 \Delta f / \beta^2, \quad (7)$$

где K – некоторый коэффициент, учитывающий физические параметры структуры; Δf – полоса частот, в которой измеряется шум. Тогда (6) примет вид:

$$\bar{U}_{ш0}^2 \approx Km^4 r_{б.а}^2 I_э^2 \Delta f / \beta^2. \quad (8)$$

В области малых и средних токов эмиттера $r_{б.а}$ и K можно считать независимыми от тока, что позволяет выразить из (8) коэффициент токораспределения:

$$m = \sqrt[4]{\frac{\beta^2 \bar{U}_{ш0}^2}{Kr_{б.а}^2 I_э^2}}, \quad (9)$$

где $\bar{U}_{ш0}^2$ и β – соответственно среднеквадратичное значение шумового напряжения и коэффициент передачи по току в схеме с общим эмиттером, измеренные при заданном токе $I_э$. Произведение $Kr_{б.а}^2$ в (9) в общем случае неизвестно, что ограничивает возможность определения абсолютного значения коэффициента m . При этом возможно исследование в выбранном диапазоне изменения тока эмиттера закономерностей изменения относительного коэффициента токораспределения, определяемого как отношение текущего значения коэффициента m к значению коэффициента токораспределения m_n при наименьшем токе исследуемого диапазона $I_{э.н}$:

$$m_{отн} = \frac{m}{m_n} = \sqrt[4]{\frac{\beta^2 \bar{U}_{ш0}^2 I_{э.н}^2}{\beta_n^2 \bar{U}_{ш0н}^2 I_э^2}}, \quad (10)$$

где β_n , $\bar{U}_{ш0н}^2$ – значения β и $\bar{U}_{ш0}^2$, измеренные при токе $I_{э.н}$.

При больших значениях сопротивления источника сигнала относительный вклад активной и пассивной областей структуры в общий уровень шума существенно изменяется. После преобразования выражения (1) с учетом (6) получим

$$\bar{U}_{ш}^2 = \bar{U}_{ш0}^2 + [C\bar{i}_{ф.п}^2 + (D/B)\bar{U}_{ш0}^2]R_r^2, \quad (11)$$

где $D/B \approx [r_э(\beta + 1)]^{-2}$. В режиме малых и средних токов отношение D/B на 2-3 порядка меньше единицы, кроме того $C \approx D$. С учетом этого (11) можно записать:

$$\bar{U}_{ш}^2 \approx \bar{U}_{ш0}^2 + CR_r^2 \bar{i}_{ф.п}^2. \quad (12)$$

Из (12) следует, что при больших значениях R_r в диапазоне малых и средних токов эмиттера основной вклад в уровень шума биполярной транзисторной структуры в области низких частот дает поверхностная составляющая шумового тока.

Результаты экспериментальных исследований. Экспериментально исследовались мощные кремниевые транзисторы НЧ-, ВЧ- и СВЧ-диапазонов. Среднеквадратичное значение шумового напряжения измерялось по общепринятой методике [9] на частоте 1 кГц при напряжении на коллекторе $U_K = 5$ В и сопротивлении источника сигнала $R_r \leq 2$ Ом. Коэффициент передачи по току β измерялся на установке Л2-42. Значения относительного коэффициента токораспределения рассчитывались по (10). Погрешность измерений и расчетов не превышала 15%.

На рис.1,а показаны зависимости $m_{отн}$ от тока эмиттера для транзисторов типа КТ803А и КТ920Г. Видно, что с ростом тока эмиттера доля тока центральной области эмиттерного перехода монотонно уменьшается. При этом крутизна спада для разных экземпляров транзисторов различна.

Иной характер зависимости $m_{отн}$ наблюдается у транзисторов типа 2Т903А (рис.1,б). В области токов 0,1–0,2 А имеется участок с резким спадом $m_{отн}$ у всех исследованных транзисторов. При дальнейшем увеличении тока характер изменения $m_{отн}$ для различных экземпляров транзисторов существенно различается: № 2 – плавно уменьшается; № 3, 4 – в диапазоне токов 0,6–1,0 А стабилизируется, № 1 – в интервале 0,3–0,6 А растет, а затем непрерывно уменьшается.

На рис.1,в приведены результаты исследований транзисторов типа 2Т907Б и КТ907А. Как видно, у транзистора 2Т907Б в диапазоне токов 0,4–0,6 А и 0,9–1,0 А имеется два участка с установившимся токораспределением, в диапазонах 0,1–0,4 А и 0,6–0,9 А коэффициент относительного токораспределения резко уменьшается. Это свидетельствует о неустойчивом характере перераспределения тока между центральной и периферийной областями эмиттерного перехода. Транзистор КТ907А исследовался в двух вариантах: в первом варианте шум измерялся на полной структуре, во втором варианте один из двух внутренних эмиттерных выводов обрывался и шум измерялся на половине структуры. Из рис.1,в видно, что у

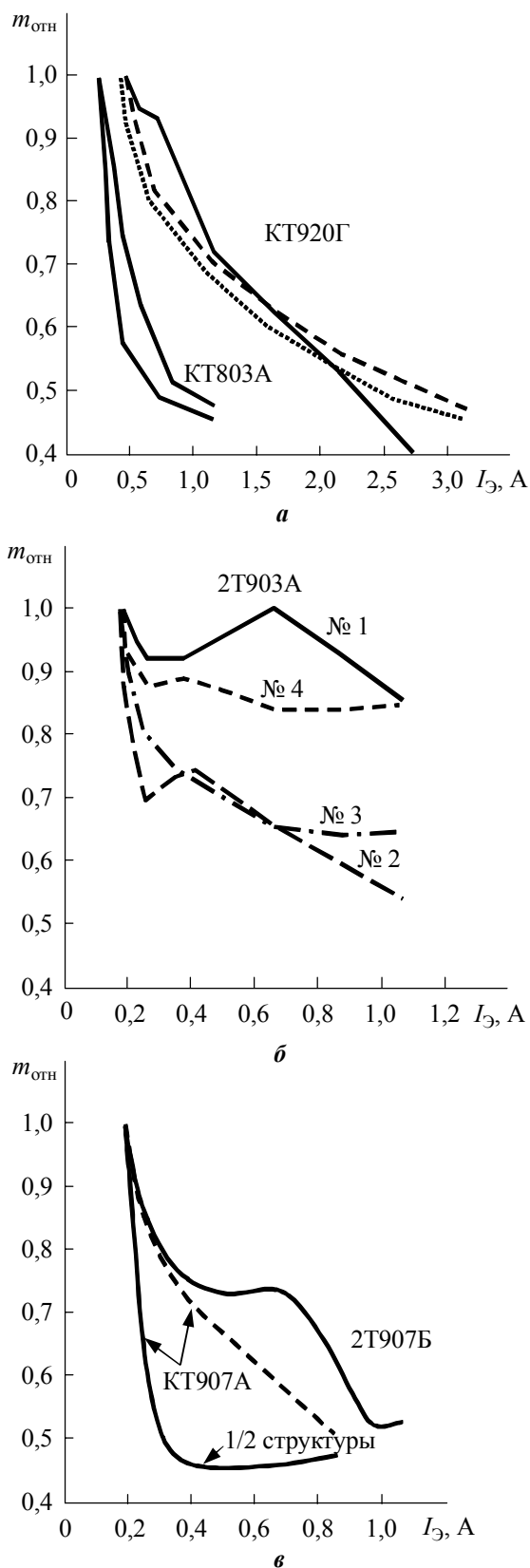


Рис.1. Зависимость относительного коэффициента токораспределения $m_{отн}$ от полного тока эмиттера $I_э$

полной структуры $m_{отн}$ уменьшается плавно и крутизна спада невысокая; у половины структуры в диапазоне токов 0,1–0,4 А наблюдается резкий спад $m_{отн}$ и в дальнейшем его значение остается практически постоянным. Наблюдаемое различие в закономерностях изменения $m_{отн}$ с ростом тока можно объяснить различием величины сопротивлений активной базы: у полной структуры это сопротивление значительно меньше, чем у половины и эффект оттеснения эмиттерного тока в полной структуре выражен слабее, чем в ее половине.

Анализ и обсуждение результатов. Для анализа полученных зависимостей рассмотрим модели токораспределения в гребенчатых структурах БТ, элементарный транзистор которой показан на рис.2. Неоднородность токораспределения обычно оценивается по величине эффективной площади эмиттера, определяемой как отношение средней плотности тока к максимальной:

$S_{эфф} = \bar{J}_Э / J_Э^{max}$. По аналогии с $S_{эфф}$ в качестве оценки значения коэффициента токораспределения принимается отношение минимальной плотности тока к средней $m = J_Э^{min} / \bar{J}_Э$.

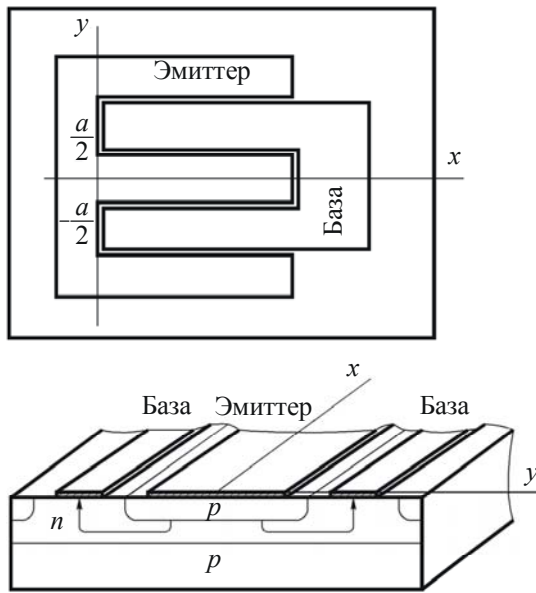


Рис.2. Геометрия «элементарного» транзистора гребенчатой структуры БТ

При рассмотрении эффекта оттеснения в гребенчатых структурах БТ с тонкой и сильно легированной базой влиянием эффектов модуляции проводимости базы и зависимостью коэффициента передачи тока от плотности тока обычно пренебрегают и при заданном токе эмиттера $I_Э$, втекающем в дорожку, изменение плотности эмиттерного тока вдоль оси y (поперек дорожки) описывается выражением [2]:

$$J_Э(\bar{y}) = \bar{J}_Э \frac{Z}{\text{tg}Z \cdot \cos^2(Z\bar{y})}, \quad (13)$$

где $\bar{J}_Э = I_Э / La$ – средняя плотность тока; $\bar{y} = 2y/a$; L и a – длина и ширина эмиттерной дорожки соответственно, а постоянная интегрирования Z находится из уравнения, получаемого из граничного условия:

$$Z \text{tg}Z = \Phi_B \bar{I}_Э, \quad (14)$$

где $\Phi_B = R_{б.а} I_{пред} / 2\beta\phi_T$ – фактор неоднородности токораспределения, обусловленный падением напряжения на распределенном сопротивлении базы; $R_{б.а} = a/4\sigma_{б.а} W_{б.а} L$ – расчетное сопротивление; $W_{б.а}$ – толщина; $\sigma_{б.а}$ – усредненная проводимость активной базы; $\bar{I}_Э = I_Э / I_{пред}$; $I_{пред}$ – предельный ток коллектора для данного типа транзистора. Плотность тока минимальна при $\bar{y} = 0$ и при действии эффекта оттеснения для коэффициента токораспределения из (13) получим следующее выражение:

$$m_B = Z^2 / \Phi_B \bar{I}_\Delta. \quad (15)$$

При преобладающем действии эффекта падения напряжения на сопротивлении металлизации распределение плотности тока вдоль дорожки описывается выражением, аналогичным (13) [2, 6]:

$$J_\Delta(\bar{x}) = \bar{J}_\Delta \frac{G}{\operatorname{tg} G \cdot \cos^2[G(1 - \bar{x})]}, \quad (16)$$

где $\bar{x} = x/L$, а постоянная интегрирования G находится из уравнения

$$G \operatorname{tg} G = \Phi_M \bar{I}_\Delta, \quad (17)$$

где $\Phi_M = R_{\Delta, M} I_{\text{пред}} / 2\varphi_T$ – фактор неоднородности токораспределения; $R_{\Delta, M} = \rho_M L / ad$ – полное сопротивление эмиттерной металлизации; ρ_M – удельное сопротивление материала; d – толщина эмиттерной дорожки металлизации. Коэффициент токораспределения в этом случае определяется выражением $m_M = G^2 / \Phi_M \bar{I}_\Delta$. Семейства зависимостей $m_B(\bar{I}_\Delta, \Phi_B)$ и $m_M(\bar{I}_\Delta, \Phi_M)$ идентичны (рис.3.) В общем случае коэффициенты неоднородности m_B и m_M монотонно спадают с ростом тока от 1 до некоторого значения, определяемого значениями Φ_B и Φ_M , причем крутизна спада увеличивается с ростом Φ_B и Φ_M .

С уменьшением факторов неоднородности в пределе до нуля ($\Phi_B \rightarrow 0$ и $\Phi_M \rightarrow 0$) из (14) и (17) следует, что $Z^2 \approx \Phi_B \bar{I}_\Delta$ и $G^2 \approx \Phi_M \bar{I}_\Delta$, т.е. $m_B \rightarrow 1$ и $m_M \rightarrow 1$.

Факторы неоднородности связаны простым соотношением: $\Phi_M = \chi \Phi_B$, где $\chi = R_{\Delta, M} \beta / R_{\Delta, a} = 4\beta \rho_M \sigma_{\Delta, a} (W_{\Delta, a} / d) (L^2 / a^2)$. При $\chi \ll 1$ неоднородность токораспределения определяется эффектом оттеснения, а при $\chi \gg 1$ – падением напряжения на сопротивлении дорожки металлизации. При $\chi \approx 1$ необходимо рассматривать совместное действие регулярных причин неоднородного токораспределения и в качестве оценки полного коэффициента токораспределения можно принять произведение частных коэффициентов: $m_\Sigma = m_M m_B = Z^2 G^2 / \chi \Phi_B^2 \bar{I}_\Delta^2$. На рис.4 приведены два семейства характеристик $m_\Sigma(\bar{I}_\Delta, \Phi_B)$ при различных значениях параметра χ .

При проектировании транзисторных структур их параметры выбирают из условия, чтобы факторы неоднородности не превышали единицы [2, 3]. Однако результаты выборочных измерений сопротивлений базы [2] и дорожек металлизации [10] у серийно выпускаемых БТ показывают, что факторы неоднородности имеют значительный разброс от прибора к прибору и у отдельных образцов могут существенно превышать единицу. Параметр χ в зависимости от величины β может изменяться в широком диапазоне зна-

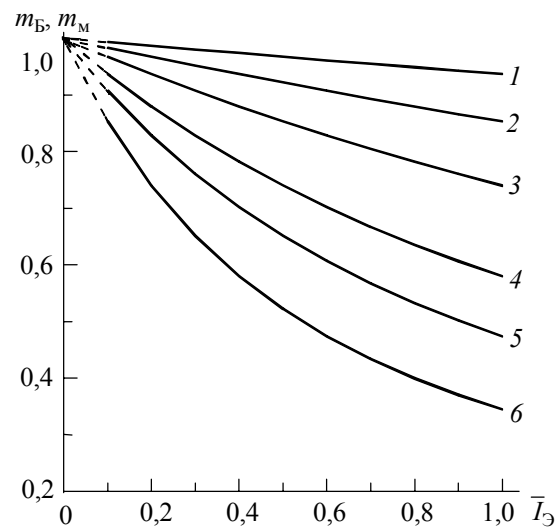


Рис.3. Зависимости расчетных коэффициентов токораспределения m_B и m_M от приведенного тока эмиттера при различных значениях факторов неоднородности токораспределения: 1 – $\Phi_B, \Phi_M = 0,2$; 2 – $\Phi_B, \Phi_M = 0,5$; 3 – $\Phi_B, \Phi_M = 1,0$; 4 – $\Phi_B, \Phi_M = 2,0$; 5 – $\Phi_B, \Phi_M = 3,0$; 6 – $\Phi_B, \Phi_M = 5,0$

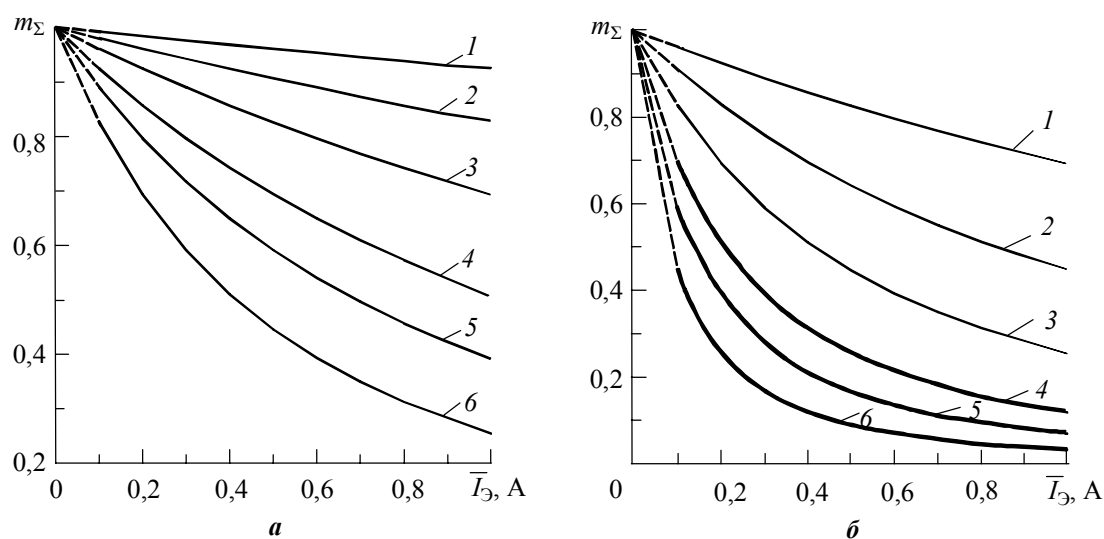


Рис.4. Семейства зависимостей полного коэффициента токораспределения $m_{\Sigma}(\bar{I}_{\Sigma}, \Phi_B)$ при трех значениях отношения факторов неоднородности $\chi = 0,2$ (а); $\chi = 5,0$ (б) (1 – $\Phi_B = 0,2$; 2 – $\Phi_B = 0,5$; 3 – $\Phi_B = 1,0$; 4 – $\Phi_B = 2,0$; 5 – $\Phi_B = 3,0$; 6 – $\Phi_B = 5,0$)

чений от 0,1 до 5,0. С учетом этого разброса зависимости коэффициента токораспределения от тока, рассчитанные по шумовым характеристикам, вполне удовлетворительно могут быть интерпретированы в рамках известных моделей токораспределения. Немонотонный характер зависимости $m_{\text{отн}}(I_{\Sigma})$, наблюдаемый у транзисторов типа 2Т903А и 2Т907Б, объясняется преобладающим действием эффекта отеснения и уменьшением коэффициента передачи с ростом тока в некотором интервале токов. В результате фактор неоднородности Φ_B в этом интервале токов уменьшается, а коэффициент токораспределения соответственно возрастает с ростом полного тока.

Проведенные исследования показывают возможность использования параметров и характеристик НЧ-шума для оценки качества активной и пассивной областей биполярных транзисторных структур. Измерение среднеквадратичного значения шумового напряжения в режиме малых и средних токов при $R_r \rightarrow 0$ дает информацию о качестве активной области, а при $R_r \rightarrow \infty$ говорит о качестве периферийной (приповерхностной) области транзисторной структуры.

По результатам измерения среднеквадратичного значения шумового напряжения в диапазоне изменения тока эмиттера можно оценить коэффициент неоднородности токораспределения по площади транзисторной структуры и выявить приборы с аномальным характером токораспределения.

Литература

1. Кремниевые планарные транзисторы / Под ред. Я.А. Федотова.- М.: Сов. радио, 1973. – 336 с.
2. Бубенников А.Н. Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и схем. – М.: Высшая шк., 1989. – 320 с.
3. Мощные высокочастотные транзисторы / Ю.В.Завражнов, И.И.Каганова, Е.З.Мазель и др. / Под ред. Е.З.Мазеля. – М.: Радио и связь, 1985. – 176 с.
4. Синкевич В.Ф., Савина А.С., Коровкина А.П. Исследование причин и механизмов отказов СВЧ кремниевых транзисторов // Электронная техника. Сер.2. – 1974. – Вып. 1. – С. 65–73.
5. Синкевич В.Ф. Физические основы обеспечения надежности мощных биполярных и полевых транзисторов // Электронная промышленность. – 2003. – № 2. – С. 232–244.

6. **Сергеев В.А.** Распределение эмиттерного тока в гребенчатых структурах мощных транзисторов // Радиоэлектронная техника: Сб. науч. тр. – Ульяновск: УлГТУ, 1999. – С. 3–10.
7. А. с. СССР №978235, МКИ Н 01L 23/02. Мощный транзистор с гребенчатой структурой / **В.А.Сергеев, Н.Н.Горюнов, В.М.Мулев, А.А.Широков, О.А.Дулов.** – 1982. – Бюл. № 44.
8. **Конторович М.Л., Черторийский А.А., Широков А.А.** Электрофлукуационный метод оценки качества биполярных транзисторных структур / Изв. Самарского научного центра РАН. – 1999. – С. 167–173.
9. **Придорогин В.М.** Шумовые свойства транзисторов на низких частотах. – М.: Энергия, 1976. – 209 с.
10. **Сергеев В.А.** Характеристики и особенности выборочных распределений мощных биполярных транзисторов по теплофизическим параметрам // Изв. Самарского научного центра РАН. – 2004. – Вып. 1. – С. 154–160.

Широков Алексей Анатольевич – кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе Ульяновского филиала ИРЭ РАН. *Область научных интересов:* электрофлукуационные процессы в полупроводниковых приборах и изделиях микроэлектроники, методы неразрушающего контроля качества и оценки надежности изделий электронной техники.

Сергеев Вячеслав Андреевич – доктор технических наук, директор Ульяновского филиала ИРЭ РАН, доцент кафедры радиотехники Ульяновского государственного технического университета. *Область научных интересов:* токораспределение и теплофизические процессы в твердотельных структурах, полупроводниковых приборах и интегральных микросхемах; методы и средства измерения теплофизических параметров изделий электронной техники.

Дулов Олег Александрович – доцент кафедры радиотехники Ульяновского государственного технического университета. *Область научных интересов:* методы и средства контроля качества полупроводниковых приборов и интегральных микросхем по шумовым и теплофизическим характеристикам.

К сведению читателей

Научно-технический журнал «Известия высших учебных заведений. Электроника» с 2006 года включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

РИНЦ – это специализированная база данных по российским научным периодическим изданиям, создаваемая на основе библиографических описаний статей, аннотаций или рефератов, а также пристатейных ссылок цитируемой литературы. База оснащена мощной поисково-аналитической системой, способной реализовать поисковые запросы различной сложности. Благодаря данной базе будет возможным получить индекс цитирования авторов и узнать импакт-факторы журналов.

Исследование влияния лазерного излучения на частоту колебаний ганновского генератора

Ю.И.Алексеев, И.В.Малиёв, С.А.Нащанский

Таганрогский государственный радиотехнический университет

Приведены экспериментальные данные, устанавливающие наличие изменения частоты ганновского генератора миллиметрового диапазона при воздействии на диод излучения полупроводникового лазера.

Исследование воздействия оптического излучения на параметры СВЧ-генераторов направлены в основном на анализ собственно эффекта воздействия без практической оценки возможности использования достигнутых результатов [1–4]. Кроме того, полученные, например, в [2] изменения мощности и частоты колебаний исследуемых генераторов настолько малы, что применение таких результатов в прикладной радиотехнике становится проблематичным.

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование воздействия оптического излучения на ганновский автогенератор миллиметрового диапазона. Ганновский генератор выполнен на серийном бескорпусном диоде Ганна типа 3А744А, где нет паразитных параметров корпуса диода. Поэтому ожидается такое изменение частоты генерации, которое может быть использовано в технически важных направлениях [1].

Техническое осуществление оптического воздействия на действующий ганновский генератор СВЧ значительно усложняет экспериментальную измерительную установку в целом. На рис.1 показана структурная схема такой установки. Выходной сигнал генератора через аттенюатор поступает либо в измеритель мощности, либо в анализатор спектра. Оптический сигнал формируется полупроводниковым лазером с встроенной фокусирующей линзой. Для фокусировки излучения лазера непосредственно на кристалле диода Ганна применяется дополнительная линза.

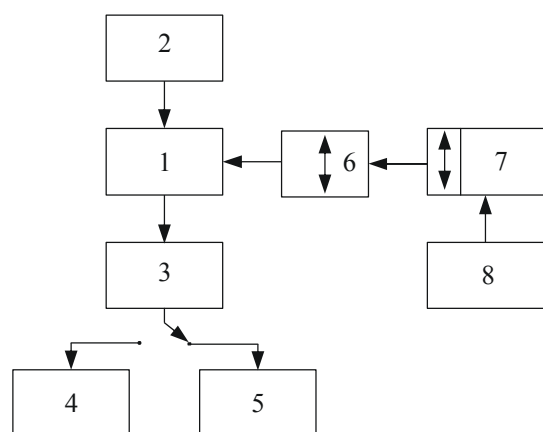


Рис.1. Структурная схема экспериментальной установки: 1 – генератор на бескорпусном диоде Ганна; 2 – источник питания генератора; 3 – аттенюатор; 4 – измеритель мощности; 5 – анализатор спектра; 7 – полупроводниковый лазер; 6, 8 – источник питания лазера

Исследуемый генератор в конструктивном отношении представляет короткозамкнутый отрезок волновода сечением 11×5,5 мм, по оси широкой стенки которого включен бескорпусный диод Ганна 3А744А. Длина резонатора генератора регулируется короткозамыкающим поршнем. Ввод оптического излучения в генератор осуществляется через отверстие, расположенное в боковой стенке волновода.

В процессе постановки эксперимента осуществлялся контроль частоты генерации, изменяющейся в зависимости от мощности внешнего оптического сигнала при различ-

ных напряжениях питания ганновского диода и при двух фиксированных положениях диода, позволивших исследовать влияние светового воздействия на ортогональные грани ганновского кристалла. Выходная мощность генератора незначительно изменялась под воздействием оптического сигнала (менее 1%). В результате можно утверждать, что отсутствует паразитная амплитудная модуляция при осуществлении частотной модуляции выходного сигнала ганновского генератора под воздействием лазерного облучения различной интенсивности.

Отметим, что бескорпусный ганновский диод типа 3A744A в конструктивном отношении наиболее подходит для такого рода экспериментов (рис.2). Диод состоит из латунного цилиндрического теплоотводящего основания, являющегося одновременно одним из полюсов питания диода, на котором расположены облучаемый кристалл диода из GaAs и диэлектрический изолятор, предназначенный для крепления второго токопроводящего контакта. Верхняя часть изолятора соединена с кристаллом диода позолоченной проводящей пластиной. Стрелками на рис.2 обозначены направления световых потоков при облучении кристалла ганновского диода (для рассматриваемого диода высота кристалла $h \approx 5-7$ мкм).

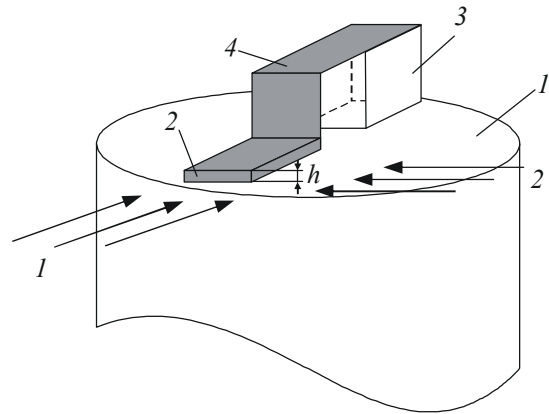


Рис.2. Бескорпусный диод Ганна типа 3A744A: 1 – основание; 2 – кристалл диода из GaAs; 3 – диэлектрический изолятор; 4 – проводящая пластина

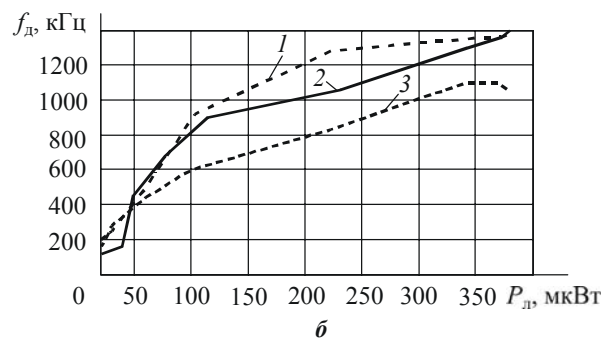
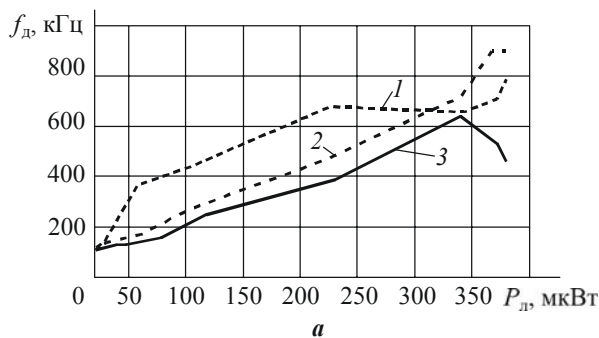


Рис.3. Экспериментальные зависимости девиации частоты от оптической мощности: а – 1 – $U_d = 4,24$ В, $f_r = 23,805$ ГГц, $P_r = 20$ мВт; 2 – $U_d = 5,28$ В, $f_r = 23,891$ ГГц, $P_r = 23$ мВт; 3 – $U_d = 4,74$ В, $f_r = 23,841$ ГГц, $P_r = 21$ мВт; б – 1 – $U_d = 5,73$ В, $f_r = 22,880$ ГГц, $P_r = 43$ мВт; 2 – $U_d = 4,76$ В, $f_r = 22,675$ ГГц, $P_r = 39$ мВт; 3 – $U_d = 5,25$ В, $f_r = 22,760$ ГГц, $P_r = 43$ мВт

Результаты эксперимента представлены на рис.3, где показаны семейства зависимостей девиации частоты генератора f_d от мощности воздействующего на диод лазерного излучения P_d . Зависимости, представленные на рис.3,а соответствуют случаю подведения оптической мощности к грани 1 кристалла диода. На рис.3,б даны результаты, полученные при облучении грани 2 (см. рис.2) (длина волны лазерного излучения $\lambda_d = 630$ нм). Следует отметить, что в обоих случаях ортогонального воздействия света на ганновский кристалл отмечено уменьшение исходной частоты генерации f_r . Включение и выключение источника оптического излучения приводит к относительно медленному переходу генератора в новый установившийся режим: вначале частота резко изменяется, после чего наблюдается плавное смещение частоты f_r . Весь процесс занимает примерно 5–7 с.

Зависимости $f_d = f(P_{\text{л}})$, представленные на рис.3,а, можно охарактеризовать как линейные, причем характеристики, полученные при напряжениях питания диода Ганна $U_d = 4,24$ В и $U_d = 4,74$ В, практически совпадают. Зависимости $f_d = f(P_{\text{л}})$, представленные на рис.3,б, имеют незначительную нелинейность: с ростом оптической мощности чувствительность $\Delta f_d / \Delta P_{\text{л}}$ уменьшается.

Таким образом, в результате проведенных исследований получены значительные отклонения частоты генерации при облучении кристалла диода световым потоком (f_d достигает 1,4 МГц, см. рис.3,б) при существенно меньшей мощности излучения лазера в сравнении, например, с мощностью в [3, 4]. Это стало возможно благодаря применению бескорпусного ганновского диода. Полученный значительный диапазон частотной девиации позволяет дать рекомендации по техническому применению представленных результатов. Такие управляемые по частоте ганновские генераторы найдут применение и в активных антенных решетках, и в синхронизированных автогенераторах СВЧ.

В заключение необходимо отметить, что при постановке эксперимента диаметр сфокусированного лазерного луча превышал высоту ганновского кристалла, что, безусловно, отразилось на потере мощности светового излучения и снижении эффективности управления параметрами генератора. При дальнейшей локализации излучения на ганновском кристалле возможно увеличение частотной девиации.

Литература

1. *Андреев В.С., Макаров Н.В.* Оптическое управление полупроводниковыми приборами СВЧ // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1995. – № 10. – С. 17–33.
2. *Усанов Д.А., Горбатов С.С., Скрипаль В.А.* Влияние ИК-излучения на генерацию диодов Ганна // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1982. – Т. XXV, № 10. – С. 93.
3. *Усанов Д.А., Скрипаль В.А.* Частотная модуляция диодов Ганна, работающих в режиме генерации, при воздействии на них лазерного излучения // Сер. Электроника СВЧ. – Вып. 7(367). – 1984. – С. 27–29.
4. *Усанов Д.А., Скрипаль В.А., Абрамов А.В.* Оптическое управление полупроводниковыми синхронизированными СВЧ-генераторами, работающими в схеме вычитания сигналов // Изв. вузов. Электроника. – 2002. – № 5. – С. 31–39.

Алексеев Юрий Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры антенн и радиопередающих устройств ТРТУ. *Область научных интересов:* генерация, усиление и преобразование СВЧ-колебаний.

Малиёв Игорь Владимирович – аспирант кафедры антенн и радиопередающих устройств ТРТУ.

Нащанский Сергей Александрович – аспирант кафедры антенн и радиопередающих устройств ТРТУ.

Метод локации источников слабых магнитных полей

Ю.Е.Григорашвили, Р.Г.Карпов, А.М.Степанов

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Рассмотрены проблемы, возникающие при локации дипольных источников слабого магнитного поля. Исследована эффективность различных вариантов магнитной антенны, а также методов расчета трех координат источника и компонент дипольного момента.

Метод магнитной локации – один из перспективных бесконтактных способов исследования содержимого непрозрачного объекта. Для этого используются собственные поля источников магнитного поля в исследуемом объеме либо поля внешних источников (магнитное поле Земли или поле специальных источников). В любом случае необходимо определить координаты и ориентацию магнитного диполя в пространстве.

Особенность данной задачи в том, что не существует технического средства, преобразующего магнитные поля от источника в изображение положения этих объектов в пространстве. Для света, который распространяется прямолинейно от источника, такое преобразование выполняет линза. Магнитные поля распространяются в пространстве по замкнутым кривым, и в этом случае роль «оптической линзы» выполняет математический алгоритм, который по результатам измерения магнитных полей в нескольких точках пространства рассчитывает положение и ориентацию источника магнитного поля.

Наибольшее развитие решение этой задачи получило при магнитной локации подводных лодок [1] и в медицине для магнитокардиографии и исследования работы мозга [2]. Современное развитие вычислительных систем и элементной базы электроники дает возможность создавать на новом уровне средства магнитной локации, реализация которых ранее была либо слишком сложной, либо недоступной. Основой реализации такой системы является эффективный алгоритм расчета, который дает однозначность решения при минимальных затратах на изготовление магнитной антенны, минимальных вычислительных ресурсах компьютера и позволяет решать задачу в реальном масштабе времени.

Анализ выполнения перечисленных требований можно свести к решению следующей задачи. Существует объект, магнитное поле которого имеет дипольный характер. Необходимо найти параметры объекта – декартовы координаты, модуль и направление дипольного момента. Для получения информации о магнитной обстановке используются датчики магнитного поля, способные измерять проекции вектора магнитной индукции (B_x , B_y , B_z) на выбранное направление в точке своего положения. Объем зоны чувствительности датчиков магнитного поля значительно меньше расстояния от датчика до объекта. Чувствительности датчиков достаточно для достоверного измерения магнитной индукции.

Математическая модель описания объекта. Формальное математическое решение задачи можно представить следующим образом [3]. Имеется массив данных о проекции магнитного поля в n точках пространства. Положение точек измерения привязано к магнитной антенне, посредством которой проводится измерение. В этой системе координат вектор магнитного поля \mathbf{B}_i в точке измерения i от диполя с вектором магнитного момента \mathbf{p} определяется выражением

$$\mathbf{B}_i = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{3(\mathbf{p}\mathbf{R}_i)\mathbf{R}_i}{R_i^5} - \frac{\mathbf{p}}{R_i^3} \right). \quad (1)$$

Здесь \mathbf{R}_i – вектор из точки положения магнитного диполя в точку пространства, где проводятся измерения компонент вектора магнитного поля (рис.1).

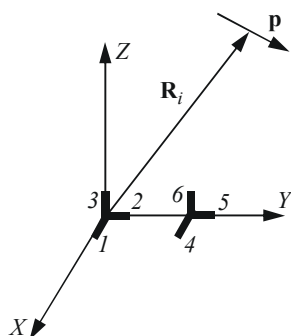


Рис.1. Схема расположения объектов при локации магнитного диполя: 1-6 – датчики

Решая систему уравнений (1) для нескольких точек измерения индукции, можно определить компоненты вектора магнитного момента диполя и его местоположение. Однако в реальных условиях решение описанной задачи имеет значительные как математические, так и аппаратные трудности. В частности, даже для идеальных условий измерения магнитного поля математическое решение задачи может быть неоднозначно или отсутствовать. На это дополнительно налагаются погрешности измерения: разброс чувствительности и сдвига нуля датчиков, неортогональность расположения датчиков в пространстве относительно друг друга; точность аналого-цифрового преобразования и динамический диапазон измерения. Кроме того, в пространстве

обычно присутствуют электромагнитные шумы. Следует иметь в виду, что искомым объектом и магнитометром являются в магнитном поле Земли, которое на несколько порядков превышает предельную чувствительность магнитометра. Влияние всех перечисленных факторов может привести к отсутствию решения.

Уменьшить влияние погрешностей можно как программными, так и аппаратными средствами. Для устранения воздействий шумов целесообразно использовать градиентометры, которые в достаточной степени нечувствительны к магнитным помехам от удаленных источников и к магнитному полю Земли [4]. Аналитическое решение для координат магнитного диполя в случае использования градиентометров можно получить из системы уравнений [1]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} B_x X_0 + \frac{\partial}{\partial y} B_x Y_0 + \frac{\partial}{\partial z} B_x Z_0 = -3B_x, \\ \frac{\partial}{\partial x} B_y X_0 + \frac{\partial}{\partial y} B_y Y_0 + \frac{\partial}{\partial z} B_y Z_0 = -3B_y, \\ \frac{\partial}{\partial x} B_z X_0 + \frac{\partial}{\partial y} B_z Y_0 + \frac{\partial}{\partial z} B_z Z_0 = -3B_z, \end{cases} \quad (2)$$

где B_x, B_y, B_z – компоненты индукции магнитного поля, созданного объектом в месте измерения; X_0, Y_0, Z_0 – координаты магнитного центра объекта в системе координат датчиков.

Однако в этом случае необходимо знать не только компоненты вектора магнитной индукции в точке измерения, но и их производные по осям. При создании прибора для локации магнитного объекта необходимо обеспечить максимальную дальность обнаружения. Магнитное поле объекта уменьшается пропорционально кубу расстояния до него, тогда как градиент уменьшается пропорционально четвертой степени. Таким образом, дальность обнаружения объекта по его магнитному полю выше, чем по его градиенту. Исходя из этого для ряда практических задач система измерения градиента не эффективна при чувствительности датчиков, доступной на настоящий момент. Поэтому рассмотрим систему, в которой можно измерить абсолютное значение магнитной индукции. Используя только проекции магнитной индукции в точках пространства, запишем следующую систему уравнений [2]:

$$\begin{cases} B_x = \frac{\mu_0}{4\pi r^5} [P_x(2x^2 - y^2 - z^2) + 3P_y xy + 3P_z xz], \\ B_y = \frac{\mu_0}{4\pi r^5} [P_y(2y^2 - x^2 - z^2) + 3P_x xy + 3P_z yz], \\ B_z = \frac{\mu_0}{4\pi r^5} [P_z(2z^2 - x^2 - y^2) + 3P_x xz + 3P_y yz]. \end{cases} \quad (3)$$

Задача представлена системой трансцендентных уравнений и не имеет простого аналитического решения. Были использованы итерационные алгоритмы [5] и компьютерные методы решения. Опробованы следующие методы нелинейной оптимизации: Гаусса–Ньютона; Левенберга–Маркара [6]; наискорейшего градиентного спуска; Нелдера–Мида; Давидона–Флетчера–Пауэлла; Бройдена–Флетчера–Гольдфарба–Шанно (квазиньютоновский метод) [5]. В качестве критерия оптимизации (целевой функции) выбрана норма разности показаний датчиков и значений магнитного поля источника в точке измерения.

Далее с некоторой степенью идеализации необходимо оценить эффективность перечисленных методов решения задачи поиска диполя. Основным критерием выбора метода является сходимость решения за ограниченное время выполнения расчета, что определяет возможность наблюдения перемещения диполя в реальном масштабе времени. Для компьютерного моделирования магнитный диполь последовательно помещался в узлы решетки куба с ребром 50 см, шаг между узлами равнялся 1 см. Поиск решения выполнялся для каждого узла. Полученный на последней итерации за ограниченное время решения результат сравнивался с эталонным и если погрешность не превышала 5%, задача считалась успешно решенной.

В таблице представлены результаты, полученные на компьютере с процессором Intel Pentium-M 1500 МГц, позволяющие сравнить эффективность различных алгоритмов. Все алгоритмы были реализованы в среде MATLAB 7, что создало основу для получения объективных оценок применительно к данной конкретной задаче.

Оценка эффективности методов

Метод	Количество успешных решений (%) за время, с		
	0,2	0,5	0,8
Бройдена–Флетчера–Гольдфарба–Шанно	22,70	33,89	35,20
Давидона–Флетчера–Пауэлла	7,43	7,44	7,05
наискорейшего градиентного спуска	7,62	8,42	9,47
Нелдера–Мида	84,30	97,54	98,62
Левенберга–Маркара	82,04	97,24	98,47

Анализ результатов компьютерного моделирования позволяет сделать следующие выводы. Градиентные методы не приемлемы для решения поставленной задачи за ограниченное время. При увеличении времени расчета методом наискорейшего градиентного спуска возрастает доля ложных решений, так как они попадают в локальные минимумы, не соответствующие истинному положению магнитного диполя. Наиболее эффективным для рассматриваемой задачи является метод Левенберга–Маркара.

Отметим, что увеличить число успешных решений при временном ограничении можно за счет реализации алгоритма на языке C++.

Минимальное количество датчиков, необходимое для поиска трех координат и трех дипольных моментов магнитного диполя, равно шести. В настоящей работе исследовалась эффективность увеличения числа датчиков для повышения достоверности решения. В проведенном компьютерном эксперименте варьировалось как число датчиков, так и их расположение в пространстве. Эксперимент показал, что увеличение числа датчиков и большой объем пространства, в котором проводятся измерения, позволяют точнее определить расположение магнитного диполя. Однако при увеличении числа датчиков, кроме снижения быстродействия, перечисленные методы оптимизации дают неверные решения из-за большого числа локальных экстремумов целевой функции. Кроме того, увеличение количества датчиков увеличивает стоимость системы, повышает сложность устройства управления и снижает скорость обработки данных.

На основе анализа всех приведенных факторов принято решение о разработке двух типов магнитных антенн, имеющих 6 и 8 датчиков. Оптимальное расположение датчиков в 6-канальной антенне показано на рис.1. Датчики представлены в виде двух групп, разнесенных на расстояние (базу), которое значительно превышает объем чувствительности датчика. Каждый датчик в группе измеряет X -, Y -, Z -компоненту соответственно. При большой базе сложно иметь высокую точность измерения, а при малой протяженности базы может нарушиться условие представления источника магнитным диполем.

Техническая реализация. Для экспериментального исследования работы алгоритма разработан и изготовлен макет системы магнитной диагностики, состоящий из матрицы датчиков магнитного поля, устройства управления датчиками и режимами измерения, устройства аналого-цифрового преобразования и сопряжения с компьютером, программы, работающей на персональном (портативном) компьютере. В приборе использованы магниторезистивные датчики магнитного поля с высокой чувствительностью по магнитному потоку. Это обеспечивает как высокую предельную чувствительность по магнитной индукции (10^{-9} Тл), так и высокую локальность измерения (1 мм^3). Применение электронных систем компенсации и стабилизации обеспечивает измерение магнитных полей в диапазоне 10^{-9} – 10^{-3} Тл. Для аналого-цифрового преобразования используются 24-разрядные АЦП. Частота дискретизации может варьироваться в диапазоне 47–1923 Гц. Обмен информацией между устройством управления измерениями и компьютером осуществляется посредством высокоскоростного последовательного интерфейса USB2.0.

Система может определять местоположение диполя как для постоянного, так и переменного поля. Для этого в системе используется быстрое преобразование Фурье и выделение с помощью «цифровой фильтрации» сигнала требуемого частотного спектра.

Этот макет адаптирован для определения положения медицинского скальпеля в пространстве размером $50 \times 50 \times 50$ см. Система регистрирует перемещение скальпеля на расстояние 2 мм. Точность определения координат составляет 1 см, а угла ориентации – 15° в центральной части объема (рис.2).

Полученный практический результат позволяет подтвердить эффективность метода Левенберга–Маркара для решения поставленной задачи, а также определить ряд направлений для совершенствования системы диагностики.

Таким образом, приведенный метод реализации пассивной магнитной локации позволяет эффективно решать многие прикладные задачи в различных технических отраслях. Создание магнитометра модульного типа на базе портативного персонального компьютера обеспечивает универсальность. В зависимости от назначения прибор может комплектоваться различным набором электронных модулей и различным программным обеспечением. Использование модульного принципа прибора значительно удешевляет разработку новых типов аппаратов и серийное производство. Предполагается разработка интеллектуальных алгоритмов работы прибора, с помощью которых автоматически выбираются оптимальные условия проведения измерений в зависимости от магнитной обстановки окружающей среды.

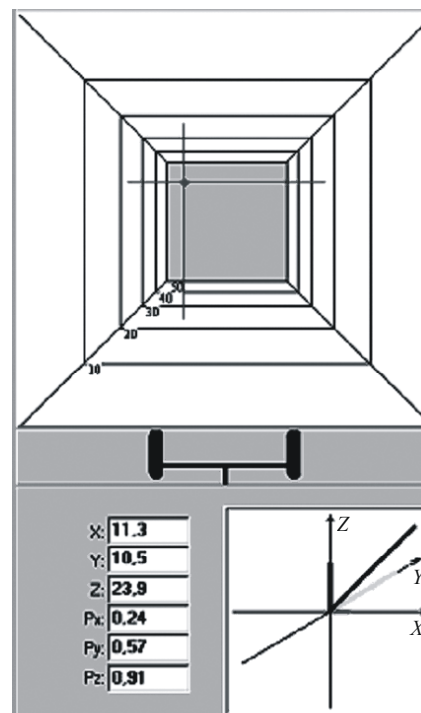


Рис.2. Графическое представление положения и ориентации магнитного диполя в пространстве

Литература

1. *Семевский Р.Б., Аверкиев В.В., Яроцкий В.А.* Специальная магнитометрия. – СПб.: Наука, 2002.
2. *Кнеппо П., Титомир Л.И.* Биоманнитные измерения. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. Манипулятор для виртуальной реальности / *С.И.Касаткин, П.А.Поляков, А.А.Абакумов и др.* // Датчики и системы. – 2001. – № 11.
4. *Введенский В.Л., Ожогин В.И.* Сверхчувствительная магнитометрия и биоманнетизм. – М.: Наука, 1986.
5. *Аоки М.* Введение в методы оптимизации. – М.: Наука, 1977. – 344 с.
6. *More J.J.* The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory // Numerical Analysis. – 1977. – Vol. 630, Springer Verlag. – P. 105–116.

Григорашвили Юрий Евгеньевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник лаборатории сверхпроводниковой микроэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* методы и системы измерения слабых магнитных полей, неразрушающие методы диагностики.

Карпов Руслан Геннадиевич – аспирант МИЭТ. *Область научных интересов:* системный анализ, управление и обработка информации.

Степанов Андрей Михайлович – аспирант кафедры электроники МИЭТ. *Область научных интересов:* информационные технологии, автоматизация и управление технологическими процессами.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 65.011.8

Методология оценки эффективности работы автоматизированной информационно-поисковой системы на основе интегральных критериев уровня качества поиска

Л.Г.Гагарина, В.В.Слюсарь

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

Рассмотрена проблема оценки и сравнения эффективности работы подсистем автоматического поиска информации систем автоматизированного делопроизводства и документооборота. Ставится вопрос о выведении единого математического интегрального критерия эффективности, основанного на доле релевантных документов, выдаваемых системой в ответ на запрос.

Для комплексного решения проблем автоматизации делопроизводства необходимо, чтобы программное обеспечение объединяло в себе совокупность технологий, предоставляющих средства работы групп людей, численность которых может достигать сотен и даже тысяч, с совместно используемыми данными в рамках локальных и глобальных сетей, а также встроенные средства электронной почты, позволяющие обеспечивать интеллектуальную маршрутизацию документов.

При эксплуатации как документоориентированных, так и иных автоматизированных информационных систем весьма важное значение имеет оценка эффективности их работы. Неотъемлемой частью любой информационной системы является автоматизированная информационная поисковая система (АИПС). Главным критерием, по которому можно оценить эффективность работы данной системы, является так называемая релевантность, т.е. степень соответствия найденной информации информационной потребности пользователя. Следует отметить, что информационная потребность может представлять собой комплекс вопросов, и рассмотренные документы могут содержать ответы на какую-то часть из них. Получение пользователем новой информации может, в свою очередь, привести к переформулировке или возникновению новых вопросов. Так происходит некоторое изменение информационной потребности. Это изменение носит субъективный характер и зависит от знаний пользователя, его обучаемости, способности разбираться в новом материале. Учет столь субъективных факторов является весьма сложной задачей. В настоящее время выделяют следующие понятия:

- формальная релевантность – совпадение тех или иных компонентов текстов запроса и найденного документа;
- действительная (содержательная) релевантность – соответствие содержания документа содержанию запроса;
- субъективная релевантность (называемая также пертинентностью) [1].

© Л.Г.Гагарина, В.В.Слюсарь, 2006

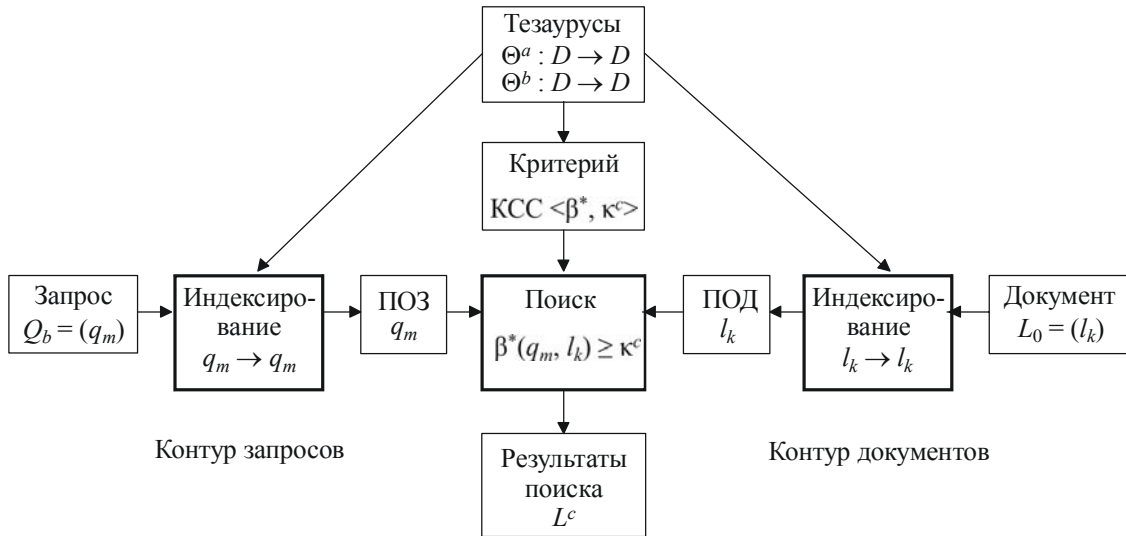


Рис. 1. Структура процессов обобщенной АИПС

АИПС представляет собой простейший объект (подсистему информационной деятельности), наиболее хорошо исследованный и поддающийся математическому описанию и моделированию. Процессы АИПС, являющиеся формальными моделями таких сложных интеллектуальных функций как анализ, обобщение, логический вывод и др., моделируются с помощью формализованных процедур двух типов:

- преобразование потоков сообщений – информационный поиск, отбор из поискового массива множества сообщений, подчиняющихся определенным формальным сообщениям;

- преобразование сообщений или документов – составление поисковых образов индексов (индексирование) документов [2].

В структурной схеме (рис.1) может быть выделен контур документов и контур запросов. Контур документов включает процессы получения множества документов L_0 и преобразования каждого.

$$l_k = \begin{pmatrix} b_{1k} \\ \dots \\ b_{ik} \\ \dots \\ b_{Dk} \end{pmatrix} \rightarrow l'_k = \begin{pmatrix} b'_{1k} \\ \dots \\ b'_{ik} \\ \dots \\ b'_{Dk} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Документ представляется в виде вектор-столбца:

$$l_k = \begin{pmatrix} b_{1k} \\ \dots \\ b_{ik} \\ \dots \\ b_{Dk} \end{pmatrix}, \quad b_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й термин входит в } k\text{-й документ;} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (2)$$

Аналогичным образом представляются поисковые образы документа, запроса, поисковые образы запросов: контур запросов включает множество запросов Q_0 и преобразование каждого запроса Q_m в поисковый образ с созданием потока поисковых образов Q'_0 .

Тезаурус – средство, используемое для индексирования, задающее преобразование любого подмножества D в другое подмножество: $\Theta: D \rightarrow D$, причем в общем случае тезаурус, применяемый для документов (Θ^b), не совпадает с тезаурусом запросов (Θ^a):

$$\Theta^a: D \rightarrow D(q_m \rightarrow q_m), \Theta^b: D \rightarrow D(l_k \rightarrow l_k). \quad (3)$$

Критерий смыслового соответствия (КСС) есть пара:

$$\text{КСС} = \langle \beta^*, \kappa^c \rangle, \quad (4)$$

где β^* – мера формальной релевантности, или мера близости поисковых образов документа и запроса; κ^c – пороговое значение меры близости, в случае превышения которого документ признается формально релевантным соответствующему запросу [1].

Сузить или расширить запрос можно соответственно путем расширения или уменьшения порога релевантности κ^c . Известен ряд мер формальной релевантности, таких как скалярное произведение (q_m, l_k), нормированное скалярное произведение (мера Танимото) и ряд других.

Поиск документов фактически представляет собой построение матрицы поискового пространства β_{mk}^* , где β_{mk}^* определяется по одному из упомянутых соотношений и в последующем составлении множества формально релевантных m -му запросу сообщений L_m , таких, что для всех m и любого l_k , принадлежащего множеству результатов поиска L_m^c :

$$\beta_{mk}^* = \beta^*(q'_m, l'_k) \geq \kappa^c. \quad (5)$$

Для оценки работы системы применяется целый ряд критериев. Для описания выхода АИПС с точки зрения потребителя информации (т.е. пользователя) используются диаграммы Эйлера-Венна, таблицы сопряженности или диаграммы $\langle a, b, c, d \rangle$, где a – число выданных релевантных документов, b – число выданных нерелевантных документов, c – число невыданных релевантных и d – число невыданных нерелевантных документов, а также некоторые другие. В целях количественного описания уровня качества поиска АИПС исторически первыми появились следующие частные критерии:

- полнота r ;
- точность p ;
- специфичность σ ;
- общность p_0 , характеризующая качество комплектования поискового массива [1].

Все эти критерии обладают одним недостатком: отдельно взятое значение любого из них не отражает полностью качество ответа на запрос, поэтому, как правило, для оценки систем используются либо их пары ($\langle r, p \rangle$; $\langle r, \sigma \rangle$ и т.д.), либо интегральные критерии. Известны два таких критерия: коэффициент линейной корреляции R выдачи и релевантности документа и критерий полезной работы η АИПС. Первый из них представляет собой корреляционный момент двух случайных величин: C – «быть выданным документом», т.е. релевантным с точки зрения системы, и I – «быть релевантным документом». Каждая из этих величин может принимать значения 0 или 1 в зависимости от документа. Математические ожидания C и I равны соответственно:

$$M[C] = P(C = 1) = \frac{a + b}{a + b + c + d}; \quad M[I] = \frac{a + c}{a + b + c + d}. \quad (6)$$

Дисперсии и ковариационный момент определяются аналогично, и окончательно коэффициент линейной корреляции определяется по формуле

$$R = \frac{\text{cov}_{СИ}}{\sqrt{\sigma_C^2 \sigma_{И}^2}} = \frac{ad - bc}{\sqrt{(a+b)(a+c)(b+d)(c+d)}}. \quad (7)$$

Предположим, что чем меньше массивы документов приходится просматривать пользователю, тем выше качество поиска. Путем несложных математических выкладок получаем, что полезная работа АИПС определяется как

$$\eta = r + \sigma - 1. \quad (8)$$

Данная мера полезной работы может изменяться в пределах от -1 до 1 . Если $\eta = 1$, то система выдает все релевантные и только релевантные документы (идеальная система), если же $\eta = -1$, то система выдает все нерелевантные и только нерелевантные документы (дезинформирующая система).

Следует отметить, что этот критерий может быть получен из двойственной формулировки исходных предпосылок, т.е. работа АИПС тем эффективнее, чем большее количество релевантных документов получает пользователь при тех же трудозатратах.

Оценка эффективности работы АИПС Министерства образования и науки РФ. Подсистема документооборота интегрированной автоматизированной информационной системы (ИАИС) Министерства образования и науки РФ создается на базе программного обеспечения Lotus Notes/Domino корпорации IBM/Lotus, а в качестве системы управления документами используется Domino.Doc – приложение для Lotus Domino Server. В состав подсистемы документооборота входит база данных официальной и нормативно-справочной информации подразделений Министерства, состоящая из электронного хранилища документов, типовая структура которого представлена на рис.2,

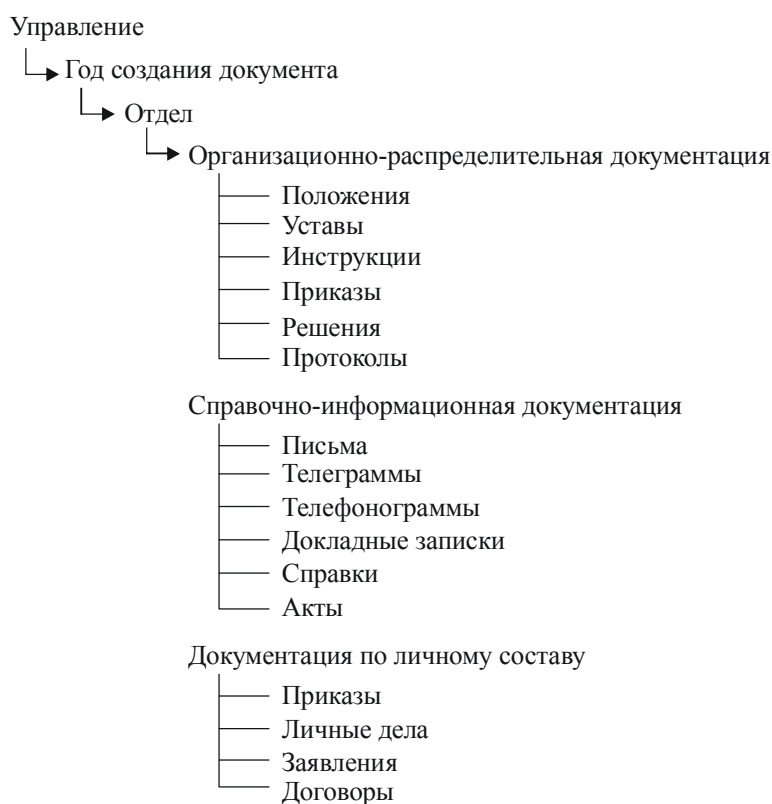


Рис.2. Структура централизованного хранилища документов для подразделения Министерства образования и науки РФ

и АИПС, с помощью которой осуществляется поиск необходимых документов. По сравнению с «ручным» поиском в массиве электронных документов работа АИПС является весьма эффективной [3].

Так, например, при обработке запроса по ключевому слову «приказ» система выдает около 900 документов ($a+b\approx 900$). Предположим, что релевантными документами являются только непосредственно приказы Министерства, т.е. содержащие слово «приказ» в названии документа (или, пользуясь общепринятой терминологией, «приказ» – это тип документа). Таким образом, далеко не все документы будут являться релевантными нашему запросу. Из примерно 900 документов, выдаваемых системой, лишь около 500 – непосредственно приказы, т.е. $a \approx 500$, $b \approx 400$.

Путем экспериментальных проверок было выяснено, что невыданных релевантных документов практически не остается – поисковая система выдает все документы, в которых содержится заданное ключевое слово. Таким образом, можно предполагать $c = 0$.

Общее количество документов, содержащихся в базе данных на момент проведения экспериментальных проверок, превысило 3000. Таким образом, число невыданных нерелевантных документов d составляет примерно 2100.

Подставив экспериментальные значения в формулы (7) и (8), получим $R \approx 0,68$; $\eta \approx 0,84$. Эти значения свидетельствуют о весьма высокой эффективности работы АИПС Министерства образования и науки РФ.

Следует отметить, что несмотря на свою очевидную пользу, упоминаемые критерии оценки эффективности работы АИПС (как частные, так и интегральные) не могут обеспечить 100%-ной объективности оценки. Однако на их основе из двойственной предпосылки работы системы можно вывести единый интегральный критерий полезности работы АИПС и релевантности выдаваемых документов, изоморфный исходным. На основе результатов анализа эффективности работы АИПС с помощью такого критерия становится возможным проведение оптимизации и улучшения работы АИПС, что является первоочередной задачей для ИАИС Министерства образования и науки РФ.

Литература

1. *Анфилатов В.С.* Системный анализ в управлении. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 350 с.
2. *Барановская Т.П.* Информационные системы и технологии в экономике. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 432 с.
3. *Белушкин С.Д., Поляков А.А., Старых В.А.* Основные принципы создания интегрированной автоматизированной информационной системы сферы образования // Индустрия образования: Сб. статей. – М., 2001. – Вып. 1. – С. 17–25.

Гагарина Лариса Геннадиевна – доктор технических наук, профессор кафедры информатики и программного обеспечения вычислительных систем МИЭТ. *Область научных интересов:* автоматизация технологических процессов и производств, управление качеством образовательных услуг на базе новых информационных технологий, разработка обеспечивающих подсистем ИУС, УВК, АИС.

Слюсарь Валентин Викторович – аспирант кафедры информатики и программного обеспечения вычислительных систем МИЭТ. *Область научных интересов:* автоматизация делопроизводства и документооборота, разработка средств надсетевоего взаимодействия информационных систем.

Использование экспертной системы для распознавания дефектов металлокерамических корпусов и коммутационных плат

А.А.Власов, Н.М.Скулкин, А.В.Зуев

Марийский государственный технический университет

Рассмотрена компьютерная обучающая программа «Эксперт». Показаны принципы создания поля знаний дефектов металлокерамических корпусов и коммутационных плат. Приведены алгоритмы построения математической модели текста и работы обучающей программы.

Для повышения скорости и эффективности обучения молодых специалистов разработана обучающая экспертная система «Эксперт», с помощью которой можно быстро распознавать дефекты металлокерамических корпусов (МКК) и коммутационных плат (МКП). Основные задачи, поставленные при разработке программы: создание поля знаний; формирование структуры оболочки для создания обучающей системы; математический анализ текста с целью создания методики быстрого усвоения текста.

Создание поля знаний. В процессе выполнения работы по результатам экспертного анализа основных видов дефектности выделена группа дефектов, характерная для конструктивных признаков изделий и заготовок. Большинство дефектов имеет набор визуализируемых признаков, доступных выявлению на рабочем месте и пригодных для организации системы автономного контроля.

Причинно-следственный анализ форм и причин возникновения дефектов изделий и заготовок является одним из основных этапов обеспечения качества в условиях производства. Учитывая сложность исследуемого технологического процесса, большое количество контролируемых и регулируемых параметров (свыше 500), постоянное воздействие на материал и большое количество факторов взаимного влияния дефектов, процесс производства МКК и МКП следует отнести к категории больших систем, не поддающихся декомпозиции. Все это существенно усложняет аналитическое, в том числе статистическое моделирование и регулирование технологического процесса. В этом случае единственным приемлемым методом анализа причин дефектов и обеспечения качества продукции является экспертный анализ, основанный на разработке причинно-следственных диаграмм (графоаналитических, функционально-диагностических моделей) как одна из форм математического моделирования объектов производства. В основе причинно-следственного анализа лежит, как правило, вербальное (словесное) описание исследуемых объектов. Их экспертное описание может быть дополнено количественной характеристикой поуровневой или сквозной значимости по отношению к причинам более высокого уровня или по отношению к данной исследуемой форме брака соответственно.

В процессе выполнения работы выделено множество дефектов, в отношении которых представлен необходимый комплект многоуровневых диаграмм. Количество уровней на каждой диаграмме определялось, во-первых, возможностью экспертного, физико-химического либо статистического анализа причин дефектов, во-вторых,

необходимой глубиной анализа, поскольку каждый из уровней причинно-следственной диаграммы прямо или косвенно связан с уровнями структурной схемы процесса производства.

Создание программного продукта. На основе поля знаний создана компьютерная программа, получившая название «Эксперт». Эту программу можно отнести к семейству автоматизированных обучающих систем (АОС). Преимущества АОС перед другими видами обучающих систем в том, что это инструментальный комплекс для создания компьютерных средств учебного назначения [1, 2].

Программа может работать в четырех режимах: режиме предварительного обучения, режиме пользователя, режиме администратора и режиме тестирования. Структурная схема работы программы показана на рис.1. В режиме предварительного обучения показан прием упрощения прочтения текстовой информации на основе построения денотатной структуры текста. Это метод формирования графической модели текста по его семантическим характеристикам. К ним относится набор «ключевых слов», основные единицы содержания текста (денотаты) и структура смысловых связей между ними. Под денотатом понимается то, что стоит за языковым выражением и соответствует элементам ситуации, моделирующей в мышлении тот или иной фрагмент действительности. Этот метод может повысить эффективность и скорость усвоения сложного материала, например технической литературы.

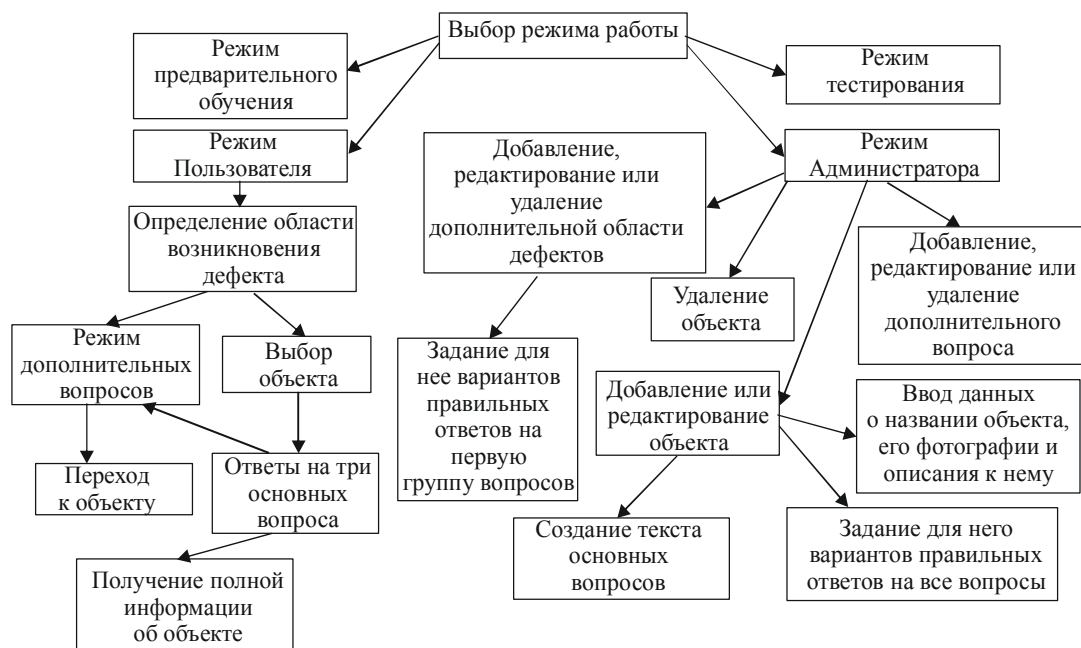


Рис. 1. Схема работы программы «Эксперт»

Алгоритм составления денотатной структуры текста следующий. Сначала определяется, какой язык используется в тексте (русский, английский и т.д.). Затем исходный текст анализируется пословно. Каждая фраза разбивается на подфразы, признаком границы служат глаголы, причастия и знаки препинания. Кроме того, выделяются признаки абзаца, которые ставятся при вводе текста. Затем в каждом фрагменте формируются цепочки слов, элементы которых образуют последовательность признаков предмета и находятся в отношении определения к некоторому другому члену этой цепочки, который назовем центром. Центры и соответствующие им цепочки выбираются по формуле

$$F(l, k, r) = k \sum_{j=1}^{k-1} (l_j + l_{j+1})(i_{j+1} - i_j) / 2, \quad (1)$$

где k – число фрагментов, содержащих N_c (ключевые слова); j – номер этих фрагментов в последовательности текста; i – порядковый номер фрагмента по тексту; r – протяженность употребления N_c .

Формула (1) позволяет определить наиболее существенные N_c , из числа которых исключаются те, которые имеют смысловый признак «процесс» или «абстрактное значение». В результате получается свертка исходного текста. Затем выявляется список тех слов, которые не вошли в «ключевые слова», но имеют смысловую связь с ними. Этот список называется рубрикатом имен ситуаций. С помощью рубрикатора формируется конечный результат в виде графа денотатной структуры. В узлах этого графа располагаются денотаты, а ребра представляют собой слова, по смыслу соединяющие денотаты между собой. Граф имеет древовидную структуру. Сверху вниз располагаются денотаты в порядке убывания встречаемости в тексте. Такая модель позволяет представить смысловую структуру текста. Для больших по объему текстов предлагается построение не одного графа денотатной структуры, а нескольких, каждый из которых соответствует определенному уровню содержания. Первый уровень составляет основное содержание, куда входят денотаты, соответствующие главным подтемам (построение плана). Затем каждая подтема может быть представлена своим графом, отображающим структуру субподтем и микротем. При этом раскрываться могут не все подтемы, а наиболее существенные. Количество уровней отображения структуры содержания зависит от глубины развернутости текста, а также от конкретных задач, которые стоят перед анализом текста. Такой полный граф надо строить при анализе реферата. В качестве примера разберем текст:

«Крошка, грязь под трафарет может попасть при несоблюдении технологии рабочим и при несоблюдении микроклимата в цехе, что является причиной брака. Крошка под трафаретом должна удаляться своевременно рабочим, и брак полностью зависит от внимательности и добросовестности рабочего. Качество пасты зависит от процесса ее изготовления и от условий хранения. При производстве пасты в неё могут попасть инородные включения, по степени вязкости может быть густая и жидкая, либо не соблюдены пропорции при ее изготовлении. При хранении существенное влияние оказывает микроклимат и время хранения».

В результате анализа получим список денотатов: рабочий, крошка, трафарет, несоблюдение, микроклимат, паста, хранение. Тогда в рубрикатор войдут слова: должна удаляться, может попасть при, влияет на, технологии, зависит от. Затем строим граф денотатной структуры (рис.2). Таким образом, стоит задача с помощью блока предварительного обучения научиться использовать в уме механизм построения денотатной структуры текста.

Режим тестирования идет в порядке очередности последним. Он позволяет проверить, насколько пользователь хорошо умеет распознавать дефекты и решать возникающие проблемы. Для быстрого создания нового теста создана программа «Генератор

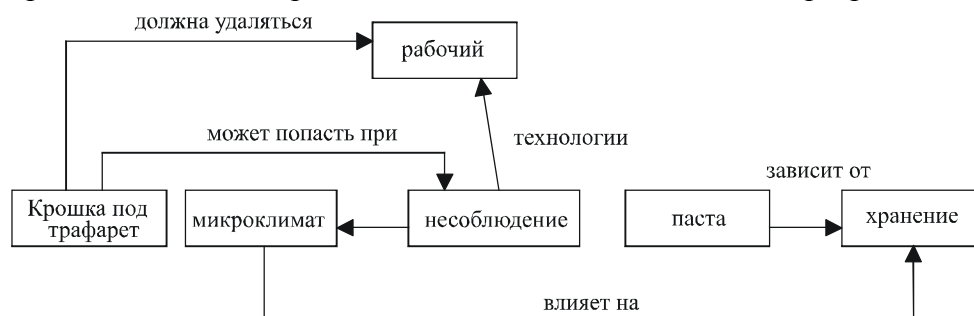


Рис.2. Пример графа денотатной структуры

тестов». Она позволяет автоматически формировать компьютерный тест в формате HTML с любым количеством вопросов. Вопросы могут быть двух типов: открытые и закрытые. Под открытым понимается вопрос, точный ответ на который должен дать учащийся. Под закрытым понимается вопрос, ответ на который выбирается из предлагаемых вариантов. В вопросы можно дополнительно вставить мультимедиа-файлы с любым из расширений. После того как сформированы все вопросы, выбирается режим компиляции, после выполнения которого создается файл в формате HTML, который уже является тестирующей программой. В конце студент должен нажать виртуальную клавишу «выполнить», чтобы узнать процент правильных ответов. Повторное прохождение данного теста невозможно без закрытия тестирующей программы, что является ее достоинством. В режиме Администратора нужно ввести определенный пароль, после которого программа начнет работать в режиме администрирования. В режим Пользователя можно войти без пароля. В ходе выполнения второго этапа работы в программу занесена информация о некоторых дефектах, а также вопросы для проверки. После ответа на вопросы пользователю нужно нажать на кнопку «Определить область» и произойдет фильтрация данных и появится список фотографий объектов только автоматически найденной области.

Для нахождения объекта, удовлетворяющего ответам пользователя, используется следующий алгоритм. Имеется k вопросов с номерами $J = \{1, 2, \dots, k\}$, на которые пользователем дан набор ответов C , где каждому вопросу j соответствует ответ C_j . Вес вопроса p_j . Имеется n объектов с номерами $I = \{1, 2, \dots, n\}$, у каждого объекта задан набор эталонных ответов O , характеризующих данный объект O_{ij} на каждый вопрос j . Для поиска объекта, удовлетворяющего заданному набору ответов пользователя, применяется метод перебора. Введем (булевы, бивалентные) переменные x_{ij} : $x_{ij} = 0$, если ответ пользователя совпадает с эталонным ответом объекта i на вопрос j ; $x_{ij} = 1$, если ответ пользователя не совпадает с эталонным ответом объекта i на вопрос j . Математическая модель данной задачи выглядит следующим образом:

$$f(x_i) = \sum_{j=1}^k p_j x_{ij} \rightarrow \min, \quad x_{ij} = 0 \vee 1,$$

где
$$x_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если } O_{ij} = C_j \\ 1, & \text{если } O_{ij} \neq C_j \end{cases}, \quad j = 1, \dots, k; \quad i = 1, \dots, n.$$

Для каждого объекта i вычисляем $f(x_i)$. Объект, для которого $f(x_i)$ будет минимальным, и будет искомым объектом.

После выбора области предлагаются два варианта: выбрать рисунок из общей коллекции (если он похож на объект, с которым обучаемый столкнулся на заводе); ответить на вопросы. В первом случае появляется увеличенная фотография дефекта с названием и тремя вопросами, на которые нужно ответить. Если ответ неправильный, то автоматически происходит переход в режим дополнительных (расширенных) вопросов. Если ответ правильный, то открывается окно с подробной информацией об объекте.

Нахождение объекта, удовлетворяющего ответам пользователя, осуществляется по другому алгоритму. Имеется k вопросов с номерами $J = \{1, 2, \dots, k\}$, на которые пользователем дан набор ответов C , где каждому вопросу j соответствует ответ C_j . Вес вопроса p_j . Имеется n объектов с номерами $I = \{1, 2, \dots, n\}$, у каждого объекта задан набор эталонных ответов O , характеризующих данный объект O_{ij} на каждый вопрос j . X_0 – первоначальное множество объектов, состоящее из n объектов. $X^* \in X_0$ – подмножество объектов первоначального множества.

Для поиска объекта, удовлетворяющего заданному набору ответов пользователя, применяется метод перебора. Количество итераций определяется количеством вопросов и равно k , порядок итераций – весами вопросов. Например, итерация $j = 1$ соответствует вопросу $C \max(p_j)$. Каждая итерация j начинается с формирования подмножества элементов X_j^* , которые удовлетворяют заданному условию. На каждой итерации j определяется, отвечает ли объект заданным условиям или нет. Для этого вычисляется оценка x_{ij} объекта i на итерации j : $x_{ij} = 0$, если ответ пользователя совпадает с эталонным ответом объекта i на вопрос j ; $x_{ij} = 1$, если ответ пользователя не совпадает с эталонным ответом объекта i на вопрос j . В случае, если ответ на вопрос j будет ошибочен, т.е. $x_{ij} = 1$, то объект исключается из множества X_j^* . Если ответ на вопрос j будет правильным, т.е. $x_{ij} = 0$, то объект остается в множестве X_j^* .

Для каждого объекта i , входящего в множество X_j^* , вычисляется оценка x_{ij} . Математическая модель данной задачи выглядит следующим образом:

$$X_j^* = \{x: x \in X_{j-1}, x_{ij} = 0, i \in I, j \in J\}, j = 1, \dots, k; i = 1, \dots, n, \quad x_{ij} = 0 \vee 1,$$

где

$$x_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если } O_{ij} = C_{ij} \\ 1, & \text{если } O_{ij} \neq C_{ij} \end{cases}.$$

Объекты, которые будут входить в множество X_k^* , и будут искомыми объектами.

В результате проведенной работы сформирована структура знаний на основе построенных причинно-следственных диаграмм, отражающих связь дефектов металлокерамических и коммутационных плат и причин, которые эти дефекты вызывают.

Созданная обучающая система «Эксперт» может работать в четырех режимах. С целью повышения эффективности усвоения информации из текста и получения краткой структуры текста предложенная методика построения графа денотатной структуры реализована в режиме предварительного обучения. Система апробирована в организациях города Йошкар-Олы: ОАО «ММЗ» (Марийский машиностроительный завод), ООО «Делвир», ООО «Мартелеком», ООО «Интерком», а также в учебном процессе МарГТУ.

Литература

1. Искусственный интеллект: Справочник / Под ред. Э.В. Попова. – М.: Радио и связь, 1990. – Кн.1: Системы общения и экспертные системы. – 464 с.
2. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб.: Питер, 2001. – 384 с.

Власов Александр Александрович – кандидат технических наук, профессор кафедры информационно-вычислительных систем МарГТУ. *Область научных интересов:* параллельные вычислительные системы, автоматы с перестраиваемой структурой, автоматизация научных исследований, искусственный интеллект.

Скулкин Николай Михайлович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой КИПР МарГТУ. *Область научных интересов:* физика отказов.

Зув Алексей Валерьевич – аспирант кафедры информационно-вычислительных систем МарГТУ. *Область научных интересов:* дистанционное обучение, экспертные системы, алгоритмы обработки текстов.

СХЕМОТЕХНИКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ

УДК 004.4'24:621.391.037.372

Комплекс программ для автоматизированного проектирования интерфейсов цифрового оборудования

А.Г.Соколов, Е.А.Чепурных

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Описан метод автоматизации проектирования интерфейсов между разрабатываемым устройством и компьютером. Показаны возможности системного подхода к проектированию взаимодействия устройства с компьютером. Разработана система расширяемых команд, позволяющая изменять протокол обмена с устройством без изменения программы, предназначенной для ввода команд.

Конфигурирование сложных цифровых устройств – нетривиальная задача, оптимальным решением которой является схема компьютер – устройство. Компьютерная программа, обеспечивающая настройку устройства, делает возможным полный и удобный доступ для настройки [1]. Однако для каждого устройства разрабатывается новая программа, которую необходимо сначала опробовать, провести тестирование и вынести заключение о ее работоспособности. Если же оборудование разрабатывается, т.е. в него вносятся новые функции, то при каждом изменении приходится снова тестировать программу с учетом возросших возможностей. Очевидно, что разработчикам надо иметь возможность добавлять, изменять и удалять команды из протоколов общения с устройством без участия программистов [2, 3]. В настоящей работе предлагается методика автоматизации проектирования интерфейсов.

Теоретическое представление взаимодействия компьютера и внешнего устройства. Система автоматизированного проектирования интерфейсов состоит из интерактивной программы с графическим интерфейсом, которая задает интерфейс и протокол, а также набора команд для работы с потенциальным устройством. Интерфейсы, протоколы представляются в виде набора библиотечных элементов, которые могут быть вставлены в проект. На выходе должны быть получены сгенерированные файлы (в различных форматах), позволяющие конечному пользователю иметь легкий и удобный доступ к устройству. Библиотека элементов должна быть расширяемой.

Дадим определения следующим понятиям [4]. *Интерфейс* – программная часть, которая реализует передачу и прием данных из какого-либо физического устройства. Назначение интерфейса – представить данные в виде, пригодном для отсылки в устройство (например, наложить стаффинг), а также преобразовать данные в вид, пригодный для протокола (например, снять стаффинг). *Протокол* – программная часть, которая реализует организацию команд и определение ответов на команды. По сути, это набор правил, по которым программа обменивается данными и выполняет команды

© А.Г.Соколов, Е.А.Чепурных, 2006

на устройстве. Эта часть программного комплекса получает высокоуровневые команды от управляющей программы (обычно в текстовом виде), представляет эти команды в двоичных кодах, понятных физическому устройству, и передает их в интерфейс. И обратно, после получения двоичного ответа определяет, что было получено от физического устройства и выдает управляющей программе информацию в текстовом виде, какая команда была выполнена и что было получено от устройства. *Набор команд* – набор высокоуровневых команд, передаваемых протоколу для выполнения. Обычно записываются в текстовом виде.

Часто у разработчиков возникает необходимость установить различные параметры в сложные цифровые устройства. Примером может служить сложное микропроцессорное устройство, которое имеет внутри себя какой-либо процессор, способный реализовать произвольный протокол общения с компьютером посредством определенного интерфейса. Благодаря этому устройство может быть настроено извне с помощью компьютера.

Различные устройства могут реализовывать разные протоколы и интерфейсы. Однако многие устройства используют одни и те же протоколы и интерфейсы, но набор задаваемых команд сильно отличается [5]. Например, модельная линия коммутаторов оснащена одинаковым интерфейсным разъемом. Каждая модель кроме идентичных команд по настройке поддерживает индивидуальные команды. В этом случае разработчик устройства должен работать совместно с программистом для реализации правильного функционирования протокола обмена. Это дорого и может повлечь за собой ошибки в реализации, которые придется долго искать, что снижает время выхода нового устройства на рынок. Поэтому разработчику предлагается предоставить инструмент, с помощью которого он мог бы задавать высокоуровневые команды и опробовать их на новом устройстве. Также можно предложить программные интерфейсы для программистов на наиболее распространенных языках программирования, чтобы они сосредоточились на логике программ, а не тратили время на программирование интеллектуального канала данных. В конечном итоге пользователь данной системы сможет самостоятельно задавать высокоуровневые команды, настраивать возможные ответы на команды и проверять правильность функционирования устройства.

Обмен между устройством и компьютером можно представить в виде трех моделей.

Передача данных из компьютера без подтверждения от устройства. Эта модель не самая лучшая для управляющей программы на компьютере, потому что без подтверждения о выполнении команды нет достоверной информации о выполнении. Модель пригодна, если с компьютера в устройство передается большое количество информации, например мультимедийной, где потеря части пакетов не приводит к неверному функционированию системы в целом, а также если встроенный микропроцессор не успевает обрабатывать данные и отвечать на запросы. Во всех остальных случаях пользоваться этим типом обмена данных не рекомендуется.

Передача данных из компьютера в устройство с подтверждением. Эта модель обеспечивает наиболее достоверное выполнение команд по пересылке данных в устройство. Обратная связь позволяет определить состояние, в котором находится канал передачи данных, и сигнализировать об этом пользователю. Также возможны различные автоматические воздействия на канал передачи данных. Например, в случае сбоя или не прохождения команды можно повторить передачу данных или попытаться проинициализировать интерфейс.

Передача данных из устройства в компьютер. Эта модель применима в случаях, когда устройство имеет возможность посылать свои данные в компьютер. Для устройства не имеет значения, обработает или нет компьютер эти данные. Примером могут служить телеметрия или какие-то другие диагностические данные, которые устройство выдает в компьютер через равные промежутки времени. Особенность данного вида обмена в том, что инициатором пересылки данных выступает не компьютер, а устройство.

Реализация протокола и интерфейса должна быть отдельной, чтобы обеспечить гибкость при настройке взаимодействия устройства с управляющей программой (рис.1). Управляющая программа использует команды протокола для управления устройством. Протокол и интерфейс взаимодействуют между собой посредством очередей. Как правило, между протоколом и интерфейсом расположены две очереди. Первая очередь является записывающей для протокола и читающей для интерфейса. В этом случае набор данных, которые представляют собой команду согласно протоколу, записываются в читающую очередь для интерфейса. После этого интерфейс записывает данные в устройство. Вторая очередь является читающей для протокола и записывающей для интерфейса. В этом случае полученные от устройства данные записываются в читающую очередь для протокола.

Протокол, интерфейс и очереди в данном случае являются программными компонентами, которые используются внутри компьютера.

Интерфейс (см. рис.1) имеет простую структуру, его назначение – только передавать и принимать данные. Обычно функции интерфейса выполняет драйвер или API операционной системы. Интерфейс только разбивает входящие данные на пакеты и передает их в протокол. Из протокола пакет, наоборот, преобразовывается в последовательность данных, которые воспринимает устройство. Это может быть байт-стаффинг или что-то подобное. Протокол представляет собой набор правил произвольной сложности куда добавляется дополнительная информация.

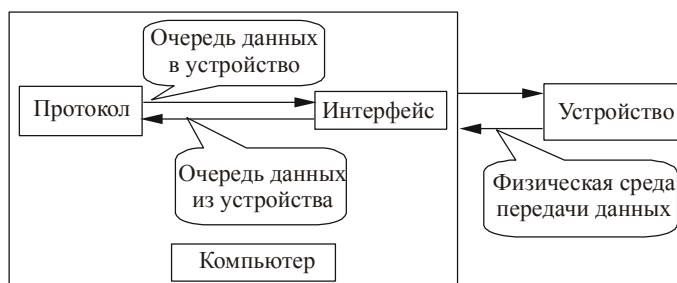


Рис. 1. Схема взаимодействия протоколов и интерфейсов, представленных компонентами

Возможность задания протокола обмена с устройством посредством высокоуровневых команд представляет интерес для разработчика. Предлагается предоставить разработчику возможность самому проектировать набор правил, по которым ведется обмен с внешним устройством. Использование интерактивной программы позволит автоматизировать процесс. Для этой цели можно использовать XML-файлы. XML – язык текстовой разметки с понятной и простой структурой. Можно считать, что это просто HTML-файл, только структуру сущностей задает пользователь. Почти все современные браузеры поддерживают этот язык, поэтому после создания XML-файла в любом текстовом редакторе его сразу же можно просмотреть и проверить правильность синтаксиса. Схематично структура XML-файла представлена на рис.2.

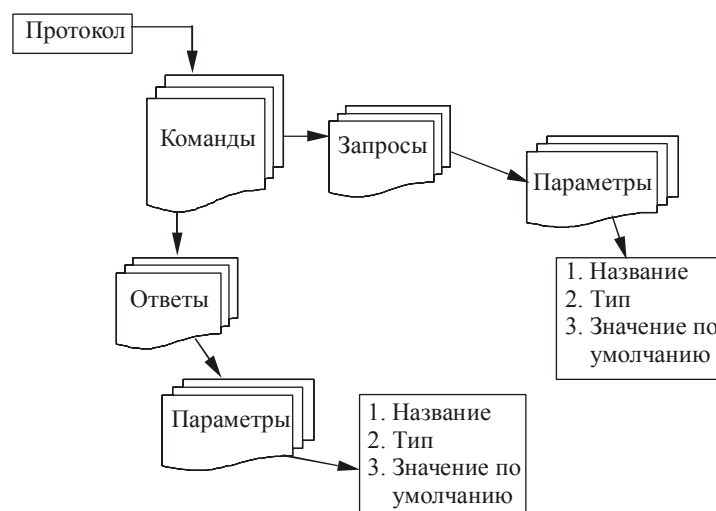


Рис.2. Структура командного файла, представленного в XML-формате

Проектирование интерфейса с устройством. Интерактивный конструктор является программой для построения графического представления обмена данными управляющей программы с устройством. Структура программы позволяет расширить набор используемых интерфейсов и протоколов без изменения самой программы.

Программа предоставляет возможность схематически задать компоненты «протокол», «интерфейс» и установить связи между ними. Расширяемость за счет добавления новых компонентов типа «протокол» достигается добавлением соответствующих XML-файлов с описанием протоколов в папку Protocols. При старте программа автоматически определяет все компоненты типа «протокол», расположенные в этой папке, и предоставляет возможность пользователю самому выбрать подходящий. Аналогично расширяемость программы за счет новых компонентов «интерфейс» достигается добавлением соответствующих DLL-файлов в папку Interfaces. Каждая DLL в обязательном порядке должна экспортировать три функции – GetPacket(Packet *p_packet), SetPacket(Packet *p_packet) и SetLogQueue(PQUEUE p_queue). С помощью этих функций компонент «интерфейс» будет обмениваться данными с компонентом «протокол».

После того как визуальное проектирование будет закончено, можно приступить к генерации выходных данных, представляющих собой файлы на языке C++ или Java. После генерации файлы можно использовать для построения управляющей программы. Обмен данными между компонентом «протокол» и управляющей программой осуществляется на основе трех очередей.

Первая очередь предназначена для передачи команд в протокол. В процедуре обработки команд высокоуровневая команда преобразуется в последовательность байт. Например, команда «Connect» в компоненте «протокол» может преобразоваться в последовательность байт. После обработки в программном компоненте «протокол» этот код попадает в программный компонент «интерфейс», в котором в свою очередь может преобразоваться. Далее эти данные попадают непосредственно в устройство.

Вторая очередь предназначена для передачи ответов из компонента «протокол» в управляющую программу. Возможные ответы: команда выполнена, команда выполнена с ошибкой или же прибыла телеметрия. В любом случае все ответы из программного компонента «протокол» в управляющую программу строго определены правилами, описанными в XML-файле описания компонента «протокол».

Третья очередь предназначена для передачи вспомогательных данных из компонентов «протокол» и «интерфейс» в управляющую программу. Например, вести прото-

копирование всех событий, возникающих при работе компонентов «протокол» и «интерфейс», для того, чтобы можно было найти причину возникновения неправильной работы программы. Для этого программа обработки протокола имеет функцию SetLogQueue(PQUEUE p_queue). Управляющая программа создает внутри себя очередь, которую передает в качестве параметров в компоненты «протокол» и «интерфейс». После этого компоненты «протокол» и «интерфейс» могут записывать данные в эту очередь. Данные будут вычитаны впоследствии управляющей программой и с ними могут быть проведены какие-либо действия (запись данных в log-файл, отображение данных в доступном для пользователя виде или и то и другое).

Управляющая программа может быть как простой, так и как угодно сложной. Главное, как управляющая программа посылает команды и получает на них ответы. Программа посылает команду в компонент «протокол» в виде обычной текстовой строки, например «WriteToAddress адрес значение». Компонент «протокол» будет интерпретировать данную команду по соответствующему правилу, если оно у него имеется. Компонент «протокол» будет искать правило с именем WriteToAddress и с двумя параметрами. Если правило найдено, то команда преобразуется в последовательность двоичных данных. После этого данные передаются в компонент «интерфейс», где они обрабатываются, модифицируются, если нужно, и передаются в устройство. Программа получает данные от устройства также в текстовом виде. Значения формируются компонентом «протокол» в виде пар, например «Answer = ОК» или «Value = значение».

Функционирование программы, когда она задает данные в текстовом виде и так же их получает, значительно облегчает создание управляющей программы. В самом простом случае это может быть консоль, которая принимает текстовый ввод команд и выводит в консоль ответ от компонентов «протокол» и «интерфейс».

Метод автоматизации проектирования интерфейсов позволяет сократить время на разработку сложного цифрового оборудования. Повторное использование компонентов исключает ошибки при разработке. Таким образом, в результате системного подхода к проектированию взаимодействия компьютера и разрабатываемого устройства уменьшается время разработки, а значит и время появления готового изделия на рынке.

Литература

1. *Петров А.В.* Проблемы и принципы создания САПР. – М.: Высшая школа, 1990. – 144 с.
2. *Ken Parker* The boundary-scan handbook: analog and digital. – Kluwer: Academic Press, 1998. – 373 с.
3. *Barr et al* (Lucent Technologies) End-to-end testing for boards and systems using boundary scan // IEEE ITC Proceedings, 2000. – 592 с.
4. *Грем К. Гудвин* Проектирование систем управления. – М.: Бином, 2004. – 912 с.
5. *Гультяев А., Машиин В.* Проектирование и дизайн пользовательского интерфейса. – М.: Корона принт, 1999. – 352 с.

Соколов Александр Георгиевич – доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и конструирования интегральных микросхем МИЭТ. *Область научных интересов:* разработка программных продуктов для автоматического проектирования интегральных схем и беспроводных телекоммуникационных систем. Разработка численных алгоритмов для решения больших систем нелинейных дифференциальных уравнений.

Чепурных Евгений Александрович – аспирант кафедры проектирования и конструирования интегральных микросхем МИЭТ. *Область научных интересов:* создание автоматизированных интерфейсов, использование нечеткой логики в экспертных задачах.

Конвертор для перевода проектов схем из САПР ПЛИС в САПР БМК

С.А.Артемов

ОАО «Ангстрем» (г. Москва)

Рассмотрены основные функции, выполняемые конвертором проекта интегральных схем из базиса ПЛИС в базис БМК. Описан маршрут перевода файлов из САПР ПЛИС в САПР БМК.

Современные программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) выпускаются как полностью готовые изделия. Они содержат не только логические элементы, но и законченные функциональные узлы, а также средства программирования межсоединений. Пользователю не нужно обращаться к изготовителю для выполнения каких-либо завершающих операций, поскольку процесс программирования ПЛИС можно осуществить с помощью обыкновенного компьютера, к которому подключен программатор. Благодаря регулярной структуре ПЛИС реализуются с высоким уровнем интеграции. Это дает основания отнести ПЛИС к стандартной продукции, что сопровождается известными преимуществами – массовостью производства и снижением стоимости [1].

В микросхемах базовых матричных кристаллов (БМК) возможность такого программирования отсутствует. Этот недостаток существенно затрудняет возможность использования БМК для быстрого создания опытных образцов. Однако применение ПЛИС при среднесерийном производстве по сравнению с БМК экономически не выгодно. Поэтому в целях наиболее быстрого получения опытного образца схема разрабатывается в системе автоматизированного проектирования (САПР) ПЛИС и отлаживается в аппаратуре. Затем проект конвертируется в САПР БМК.

В настоящей работе описана разработанная программа ConvChip, позволяющая конвертировать проект схемы из любой САПР ПЛИС в САПР БМК для моделирования полузаказных микросхем на базе БМК. Конвертор осуществляет перевод и модификацию схемы, тестовых векторов и сопутствующей технической информации.

Маршрут для разработки проекта БМК с использованием проекта ПЛИС. Маршрут предназначен для разработки проектов микросхем на базе БМК с использованием для этого проекта ПЛИС, разработанного в САПР ПЛИС, с последующим моделированием проекта в САПР БМК. Данный маршрут можно применять вне зависимости от типа САПР ПЛИС и САПР БМК. Маршрут состоит из нескольких этапов: разработка проекта ПЛИС; предварительная обработка проекта ПЛИС; получение результатов моделирования на внутренних точках схемы; выполнение процедур для анализа работоспособности схемы; применение алгоритма локализации расхождений временных диаграмм для схемы, представленной в различных базисах; разработка проекта БМК.

Разработку проекта ПЛИС выполняет либо заказчик полузаказных схем на базе БМК, либо изготовитель этих микросхем. При разработке схемы и тестов ПЛИС выполняются: разработка модулей схемы, иерархически вложенных друг в друга; выбор элементной базы для модулей самого нижнего уровня; определение элементов, связей между ними и компиляция проекта ПЛИС; разработка тестов и моделирование проекта ПЛИС; программирование ПЛИС и проверка его работоспособности в аппаратуре.

В тесте ПЛИС входные воздействия могут начинаться до момента окончания переходных процессов, которые происходят на выводах схемы. В итоге в конце входных воздействий реакция схемы будет неопределенной. Такое обстоятельство затрудняет формирование тестов для проекта БМК в процессе конвертирования тестов ПЛИС. Поэтому на данном этапе в исходном тесте ПЛИС и конечном для БМК выполняется вычисление оптимального периода входных воздействий. Длительность вычисленного оптимального периода входных воздействий больше длительности любого переходного процесса, который реализуется в схеме в базисе ПЛИС и БМК. Таким образом, при моделировании с оптимальным периодом входных воздействий реакция схемы к моменту подачи следующего входного воздействия всегда будет определенной.

Для выполнения процедур анализа работоспособности схемы и применения алгоритма локализации расхождений временных диаграмм необходимы результаты моделирования на внутренних точках схемы. Во многих САПР ПЛИС возможность автоматического получения таких результатов отсутствует. Поэтому внутренние точки объявляются как внешние выводы схемы, после чего выполняется моделирование проекта ПЛИС. Далее схема и тест ПЛИС экспортируются в текстовые форматы. Конвертор имеет множество параметров для настройки на эти форматы для различных САПР. Затем проект ПЛИС конвертируется в базис БМК. При этом осуществляется: перевод структуры схемы и тестов из экспортных файлов ПЛИС в импортные форматы САПР БМК; стандартная модификация проекта; создание технической информации; занесение тестов ПЛИС в базу данных конвертора. Затем проект БМК моделируется в САПР БМК, после чего тесты БМК заносятся в базу данных конвертора.

Процедуры для анализа работоспособности схемы необходимы для устранения расхождений в ответных реакциях при сравнении исходного теста ПЛИС и результирующего теста для БМК. Все процедуры для анализа работоспособности схемы выполняются конвертором автоматически.

Алгоритм локализации расхождений временных диаграмм необходим для анализа данных, полученных после выполнения процедур для анализа работоспособности схемы. При выполнении алгоритма конвертор на основе результатов моделирования для внутренних точек схемы делает различные предположения причин возникновения расхождения ответных реакций на выводах схемы. Все предположения описываются на объектном языке, рассмотрение которого выходит за рамки данной статьи. Рассмотрим разновидности стандартной модификации проекта.

Оптимизация тестовых векторов. При конвертировании тестов конвертор производит оптимизацию тестов, т.е. удаляет векторы, на которых реакция схемы имеет переходные процессы [2]. Поскольку в САПР ПЛИС время поступления данных на входы микросхемы на протяжении всего теста постоянно изменяется, то происходит вычисление периода одинакового для всех тестовых воздействий. Вычисление данного периода необходимо, если контрольное и измерительное оборудование, на котором тестируется схема БМК не в состоянии менять период на протяжении теста. Коррекция тестовых воздействий осуществляется конвертором с помощью множества опций и настроек, учитывающих специфику контрольного и измерительного оборудования и выбранной библиотеки БМК.

Структура экспортного файла из САПР ПЛИС записана в формате EDIF или в аналогичном. В процессе перевода проекта конвертор преобразует экспортный формат в импортный формат САПР БМК. Базисы ПЛИС и БМК сильно отличаются, поэтому в процессе конвертирования структура схемы существенно модифицируется. Рассмотрим различные способы обработки структуры схемы.

Сброс триггеров. Сразу после включения ПЛИС происходит сброс всех триггеров. Таким образом, перед подачей первого тестового вектора содержимого каждого триггера известно [3]. После включения БМК состояние триггеров не определено, поэтому после подачи тестовых векторов реакция схемы становится непредсказуемой на протяжении нескольких тестов. Для устранения данной проблемы конвертор устанавливает цепь сброса для всех триггеров, которая включается только перед началом тестирования для обнуления содержимого всех триггеров.

Устранение конфликтов источников для двунаправленных выходов. Элемент с тремя состояниями TRI при сигнале OE = 1 пропускает сигнал с входа на двунаправленный вывод. При сигнале OE = 0 цепь входного сигнала Input отключена и сигнал с двунаправленного вывода поступает вглубь схемы. Таким образом, с помощью элемента TRI в САПР ПЛИС осуществляется управление двунаправленным выводом. В САПР ПЛИС такое подсоединение не вызывает особых проблем, но в схеме, полученной после конвертирования в базис БМК, могут происходить конфликты источников сигналов. Конвертор устраняет такие конфликты путем замены элементов TRI на схему, которая управляет режимом двунаправленного вывода.

Оптимизация структуры схемы после конвертирования. Экспортная схема из САПР ПЛИС имеет большой коэффициент избыточности по числу вентилях по сравнению с аналогичной схемой, сделанной сразу в базисе БМК. На рис.1 показан типичный фрагмент схемы в формате EDIF после экспорта из САПР ПЛИС, который выполняет

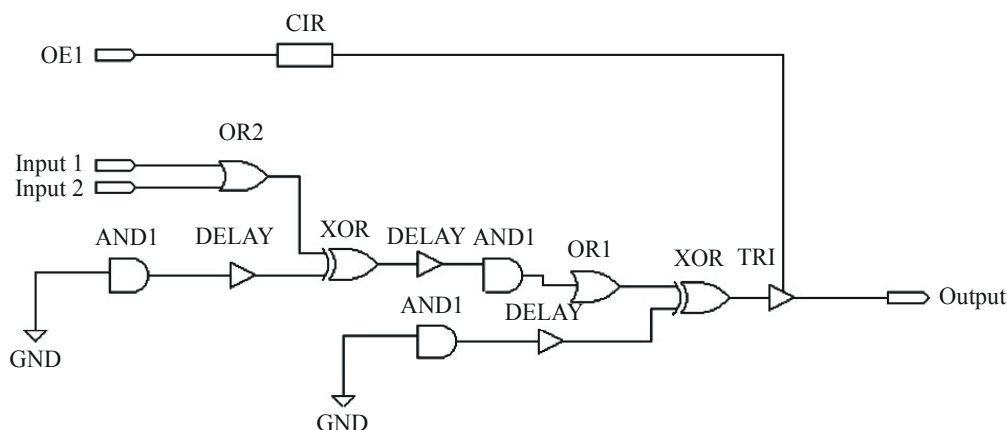


Рис.1. Фрагмент схемы EDIF после экспорта структуры

логику «ИЛИ» на элементе OR2. CIR – любая схема, не представляющая интерес в данном случае. Элементы DELAY, AND1, OR1 и XOR2 не влияют на логику работы данной схемы, поэтому их можно удалять из схемы, но при этом надо учитывать появившиеся «гонки» сигналов. На рис.2 приведен типичный фрагмент схемы, который сделан сразу в формате EDIF без использования САПР ПЛИС. Данная схема также реализует логику «ИЛИ», но при этом число используемых вентилях существенно меньше. Поэтому и ячеек БМК, необходимых для данного фрагмента схемы, тоже будет меньше. Как показывает практика, такая оптимизация сокращает емкость схемы в два-три раза, что существенно сказывается на экономии ресурсов кристалла БМК. Рассмотрим основные параметры оптимизации схемы.

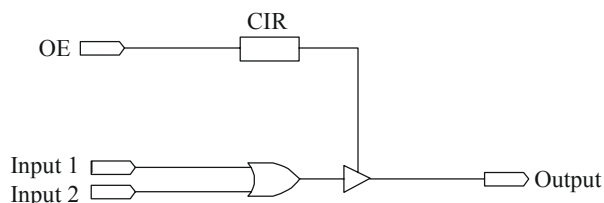


Рис.2. Фрагмент схемы EDIF, разработанный в базисе БМК без САПР ПЛИС

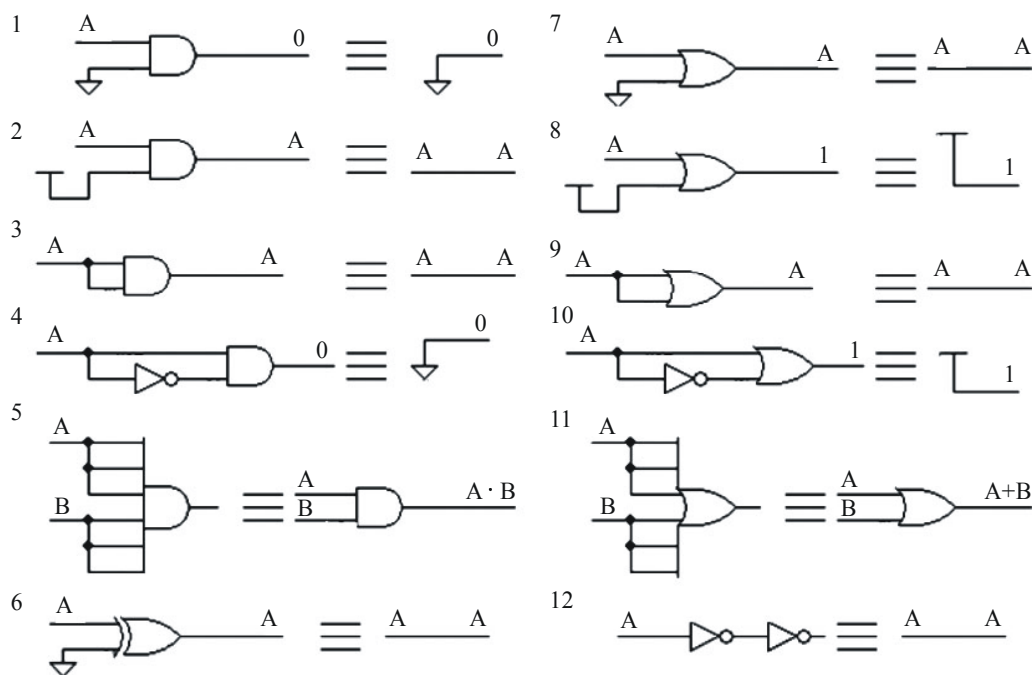


Рис.3. Способы редукции функций логических элементов

На рис.3 показаны способы редукции функции логических элементов, которые выполняет конвертор при оптимизации. Слева от знака тождества изображен фрагмент схемы до оптимизации, справа – после оптимизации. Конечной целью любого такого преобразования является сокращение числа вентилей, необходимых для реализации схемы. Естественно, что любая оптимизация не должна приводить к изменению логики работы схемы. Конвертор реализует редукцию, обусловленную: подключением входов к шине земли и питания (функции 1, 2, 6, 7, 8); объединением нескольких входов (функции 3, 5, 9, 11); подачей на вход прямого и инверсного сигнала (функции 4, 10). Происходит также устранение цепочек подряд идущих инверторов в соответствии с функцией 12. Отметим, что эти функции справедливы для многовходовых логических элементов.

На рис.4 показаны дополнительные функции, в результате которых исходный элемент удаляется из схемы. Эти функции справедливы для любого числа входов. На рис.5

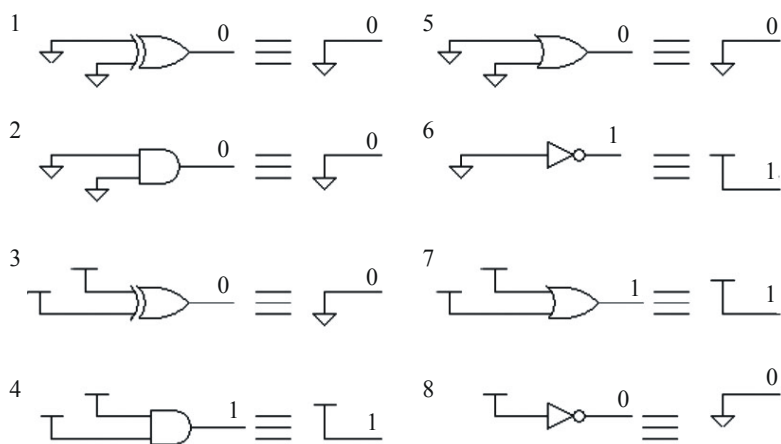


Рис.4. Дополнительные функции логических элементов

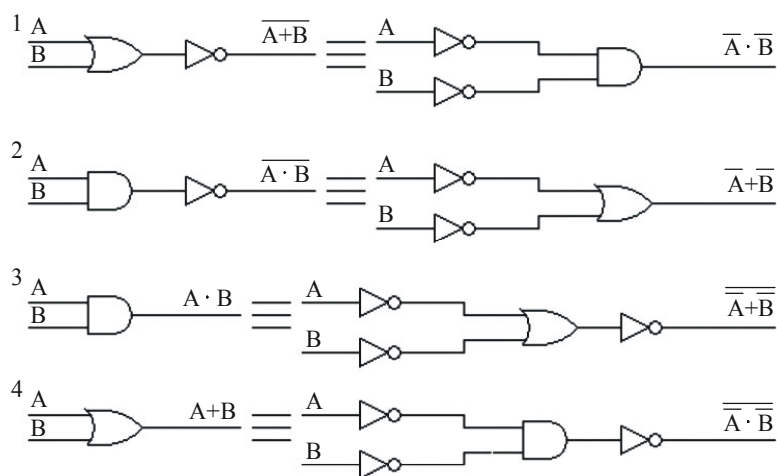


Рис.5. Следствия из теорем Де-Моргана

показаны следствия из теорем Де-Моргана, которые также учитываются во время оптимизации. Затем конвертор показывает отчет о проделанной работе, где отражены фрагменты схем до и после оптимизации, а также ссылка на одну из вышеуказанных булевых функций. В случае необходимости часть логических элементов можно исключить из применения при конвертировании схемы, задав соответствующие опции.

Основные настройки программы ConvChip. Конвертор ConvChip содержит более двухсот различных опций, которые позволяют настраивать перевод проекта схемы под конкретные требования. Рассмотрим основные группы настроек: настройки формата конечных файлов; настройки контрольного и измерительного оборудования; настройки тестовых векторов; настройки структуры схемы; общие настройки конвертора.

При экспорте проекта схемы из САПР ПЛИС происходит переименование шин, состоящих из нескольких выводов, имен связей, имен элементов и т.д. Иными словами, имена, которые задал разработчик в системе проектирования, могут иметь другие названия в файле экспортных временных диаграмм тестовых векторов и в структуре схемы на языке EDIF. Ситуация усложняется еще тем, что формат имен выводов в программе САПР БМК, которая использует конвертированный проект в базисе БМК, имеет другие правила построения имен идентификаторов. Опции данной группы позволяют настроить тип выводов схемы, имен связей и элементов. В данную группу также входят функции, которые изменяют формат конвертирования файлов в базис БМК.

Формирование временной сетки обеспечивает построения тестов с постоянным периодом подачи входных воздействий, т.е. по правилам контрольного и измерительного оборудования для БМК. В зависимости от выбранного корпуса микросхемы указывается напряжение питания, максимально возможное количество выводов, номера выводов земли и питания, данные для карты заказа и т.д.

Разработчик может для исходной схемы в базисе ПЛИС создавать несколько файлов тестов, причем все они могут содержать различные выводы. Настройки данной группы в зависимости от требований к формату тестов могут изменять систему исчисления тестовых элементарных проверок, доопределять в тесте не заданные выводы, разбивать векторы на логически законченные блоки, вводить комментарии и т.д. Если в тесте заданы внутренние точки, то при необходимости конвертор их либо устраняет, либо преобразует к определенному виду.

Настройки структуры схемы устанавливают стандартные модификации проекта, виды которых зависят от требований системы моделирования к структуре схемы, а также от различных проблем, появляющихся после перевода проекта в базис БМК. Все модификации можно задать с помощью опций конвертора либо написать их на объектном языке, встроенном в конвертор.

К общим настройкам конвертора относятся функции поиска, позволяющие отыскивать фрагмент схемы между двумя заданными выводами для последующего анализа. К ним также относятся опции, необходимые для создания отчетов о процессе конвертирования, типе выявленных ошибок в схеме и т.д.

Существует категория проблем, которые не влияют на процесс моделирования конвертированной схемы в базисе БМК, но могут привести к неопределенному поведению схему на этапе ее изготовления [4], например нарушение нагрузочных способностей элементов. Для устранения этой проблемы конвертор находит «перегрузки» и формирует цепь усиления сигнала. Естественно, что на логику процесса моделирования такая ошибка не повлияет, но реальная схема может работать некорректно.

Методы анализа проекта. После выполнения стандартных модификаций проекта ответные реакции, указанные в тесте ПЛИС и БМК, имеют расхождения. Эти расхождения приходится устранять схемотехнику самостоятельно с помощью алгоритма локализации расхождений временных диаграмм, используя данные, полученные при выполнении процедур для анализа работоспособности схемы [5]. Конвертор выполняет следующие процедуры:

- просмотр результатов моделирования на внутренних точках, которые указаны непосредственно на графических изображениях элементов схемы;
- поиск переходных процессов в ПЛИС, которые не успели окончиться к следующему входному воздействию;
- поиск активных фронтов на управляющих входах триггеров, длительность которых меньше минимально допустимой величины для данного типа триггеров;
- поиск нарушения установки данных на триггерах;
- моделирование проекта БМК в САПР ПЛИС;
- наложение тестовых временных диаграмм, полученных при разных периодах.

Метод просмотра результатов моделирования на внутренних точках позволяет видеть значения всех внутренних точек схемы на протяжении всего теста. Причем рассматриваются значения одновременно в базисе ПЛИС и БМК. Такой метод дает возможность оценить расхождение результатов моделирования на внутренних логических элементах, начиная с того выхода, на котором произошла ошибка моделирования в системе САПР БМК.

Если изменения входных воздействий происходят слишком быстро, то из-за наличия неоконченных переходных процессов на некоторых выходах реакция схемы будет неправильна. Эти выходы нужно маскировать на соответствующих тестовых векторах. При дальнейшем анализе можно найти элемент внутри схемы, на котором не выполняется его логическая функция.

В схеме после конвертирования выполняется поиск кратковременных скачков напряжения на входах триггеров, которые не предусмотрены логикой работы схемы. Также выполняется поиск кратковременных управляющих фронтов импульсов, на которые триггеры не успевают срабатывать. Такие фронты предусмотрены работой схемы, но при конвертировании отсутствует сохранение временных соотношений. Поэтому в тесте БМК эти фронты имеют меньшую длительность, чем в исходном тесте ПЛИС [6].

После перевода структуры схемы вследствие разных динамических параметров элементов библиотеки базиса ПЛИС и БМК может произойти нарушение установки данных на триггерах, в результате чего в триггер будут записаны неправильные данные.

Моделирование проекта БМК в САПР ПЛИС применяется, когда необходимо проанализировать адекватность тестов для схемы в базисе БМК по отношению к изначальному проекту ПЛИС. Иными словами, конвертированный тест для схемы в базисе БМК используют для моделирования схемы в САПР ПЛИС.

Часто бывает необходимо проанализировать расхождение тестов, имеющих одинаковые входные воздействия и различные ответные реакции. Эти тесты получены при разных периодах входных воздействий, причем тесты принадлежат только одному базису. Сравниваются также тесты в различных базисах, полученные при одинаковом оптимальном периоде и наборе входных воздействий, но имеющие различные ответные реакции.

В заключение отметим, что существующая версия конвертора ConvChip предполагает дальнейшее развитие в следующих направлениях: расширение инструментальных средств, необходимых для анализа работы схемы; расширение числа опций и настроек программы; автоматическое устранение наиболее распространенных расхождений временных диаграмм, появляющихся во время моделирования схемы в САПР БМК.

В настоящее время существуют пакеты программ, позволяющие выполнять рассматриваемый перевод схем, но ни один из них не имеет функций, необходимых для оптимального перевода проектов их базиса ПЛИС в базис БМК, нет выполнения процедур для анализа работоспособности схемы. Другие пакеты программ не имеют алгоритма для нахождения причин возникновения расхождений в схеме БМК при ее моделировании, а также способов для их автоматизированного устранения. К тому же отсутствует гибкая система настроек на различные экспортные и импортные текстовые форматы САПР ПЛИС и САПР БМК.

Литература

1. *Новожилов О.П.* Основы цифровой техники: Учеб. пособие. – М.: ИП РадиоСофт, 2004. – 528 с.
2. *Артемов С.А.* Разработка конвертора проекта интегральных схем из базиса ПЛИС в базис БМК // Изв. вузов. Электроника. – 2005. – № 1. – С. 42–45.
3. *Семенов Б.Ю., Шелестов И.П.* Путеводитель в мир электроники. Кн. 2. – М.: СОЛОН-Пресс. – 2004. – 352 с.
4. *Wakerly J.F.* Digital Design Principles and Practices 2-nd edition. Prentice Hall. – Englewood Cliffs, New Jersey, 1994.
5. *Артемов С.А.* Система управления переводом проектов в базисе ПЛИС при производстве микросхем в базисе БМК // Современные наукоемкие технологии. – 2005. – № 1. – С. 120, 121.
6. *Артемов С.А.* Автоматизированная система перевода структур схем из языка EDIF на язык структур // Материалы конф. «Системные проблемы надежности, качества, информационных и электронных технологий (2004 г., Сочи). – М.: Радио и связь, 2004. – С. 186, 187.

Артемов Сергей Артемович – аспирант ОАО «Ангстрем-М». *Область научных интересов:* схемотехника, программирование.

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.396.676

Пространственное подавление помех с использованием цифровой антенной решетки

В.В.Чистюхин, К.С.Лялин, В.И.Сизов, В.Ю.Кочетков

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Рассмотрены основные вопросы построения и функционирования цифровых антенных решеток. Дано описание действующего макета цифровой антенной решетки для пространственного подавления помехи. Сформулированы основные задачи, которые необходимо решить в процессе создания цифровой антенной решетки.

Развитие современных систем коммуникаций предполагает создание быстродействующих средств передачи данных, осуществляющих обработку больших потоков информации. При этом к каналу связи предъявляются все более жесткие требования по помехозащищенности. Это связано с тем, что максимальная пропускная способность любого канала передачи данных определяется отношением сигнал/(шум+помеха). При эксплуатации систем беспроводной связи возникает необходимость снижения уровня активных помех (т.е. тех составляющих шума канала, которые обусловлены наличием в эфире других источников радиосигнала, например соседних базовых станций сотовой телефонии) и увеличения количества пользователей базовой станции, работающих одновременно на одной частоте.

Цифровая антенная решетка (ЦАР) является одним из способов решения проблемы повышения информационной емкости канала связи. Несмотря на преимущества, ЦАР до настоящего времени не получала широкого распространения из-за дороговизны и сложности создания цифровой диаграммообразующей схемы (ЦДОС). В последнее десятилетие XX в. в связи с ростом количества пользователей системами беспроводной связи (сотовая телефония, беспроводной интернет, локальные беспроводные сети и т.д.) и значительным удешевлением элементной базы для систем цифровой обработки сигналов (ЦСП, ПЛИС) [1–3] создание относительно недорогих коммерческих ЦАР стало вполне возможным. В связи с этим многие крупные производители оборудования для систем сотовой связи, например Ericsson, разрабатывают адаптивные антенные системы на основе ЦДОС [4, 5].

Рассмотрим ряд функциональных особенностей ЦАР по сравнению с обычными антенными системами. Обычная «всенаправленная» антенна базовой станции излучает и принимает волны во всех направлениях. При этом во многих случаях эта излучаемая мощность становится интерферирующей помехой соседним базовым станциям и пользователям других сетей. Это приводит к снижению отношения сигнал/(шум+помеха) и ухудшению связи. В отличие от указанной всенаправленной системы ЦАР позволяет сфокусировать энергию непосредственно к заданному пользователю и сформировать

© В.В.Чистюхин, К.С.Лялин, В.И.Сизов, В.Ю.Кочетков, 2006

ноль в направлении нежелательного сигнала, что предполагает возможность распознавания сигналов (какой является полезным, а какой помехой). В принципе такая задача может быть решена с использованием аналоговой адаптивной антенной решетки, однако даже система, работающая с аналоговым сигналом, должна иметь в своем составе решающее устройство, вырабатывающее сигналы управления весовыми коэффициентами, т.е. какой-либо микропроцессор. Для создания амплитудно-фазового распределения используют аттенюаторы, что неизбежно приводит к потере энергии полезного сигнала, который в дальнейшем подвергается обработке. В ЦАР указанной проблемы нет поскольку формирование диаграммы направленности (ДН) включено непосредственно в процесс цифровой обработки сигнала. Таким образом, ЦАР позволяет обеспечить дополнительную степень свободы при разделении сигналов от различных пользователей к широко применяемым схемам разделения: частотному (FDMA – frequency division multiple access), временному (TDMA – time division multiple access) и кодовому (CDMA – code division multiple access), а также и пространственное разделение сигнала (SDMA – space division multiple access) [3].

В современных системах связи для формирования кодов с расширенным спектром повсеместно используются цифровые синтезаторы сигнала (Direct Digital Synthesizer). Если включить в синтезируемый сигнал нужные для данного канала амплитуду и фазу, то можно управлять лучом цифровым способом и на передачу, что открывает возможность для создания передающих и, соответственно, приемно-передающих ЦАР [6, 7].

Одной из основных задач ЦАР является формирование ДН заданной формы, что фактически означает расчет коэффициентов требуемого амплитудно-фазового распределения, на которые необходимо умножать поступающие на вход цифровой схемы суммирования сигналы от разных каналов. В отличие от АФАР суммирование сигналов производится после преобразования сигналов по частоте и их оцифровки.

Цель настоящей работы – исследование пространственного подавления помех с использованием действующего макета 4-элементной ЦАР. Разработанный авторами макет позволяет осуществить подавление двух сигналов помехи (количество подавляемых помех определяется ограничениями метода вычисления весовых коэффициентов), входящих по известным направлениям, формируя нули диаграммы направленности в этих направлениях и сохраняя положение основного лепестка неизменным.

Для реализации поставленной задачи предлагается использовать ЦАР диапазона $2,45 \pm 0,05$ ГГц, структурная схема которой приведена на рис.1. Функционально создаваемый макет состоит из трех блоков:

- антенны, которая представляет собой стеклотекстолитовую подложку (FR4) толщиной 0,2 мм с 4 стандартными печатными излучателями, расположенными на расстоянии 98 мм друг от друга, помещенную на высоте 5 мм над металлическим экраном. При такой конфигурации рабочая полоса частот излучателей составляет примерно 150 МГц, что полностью перекрывает требуемый рабочий диапазон;
- приемника, который содержит маломощные усилители, синтезатор частот, полосовые фильтры и устройства преобразования частоты;
- процессора – схемы цифровой обработки сигнала и управления решеткой, которая включает в свой состав аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи, схему суммирования и умножения, устройства управления приемником и интерфейс обмена с персональным компьютером.

В процессе работы над макетом были сформулированы и решены специфические (характерные только для ЦАР) задачи:

- представление входных сигналов в виде комплексных величин в ЦДОС;
- выбор аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с требуемой для обеспечения заданного динамического диапазона разрядностью;

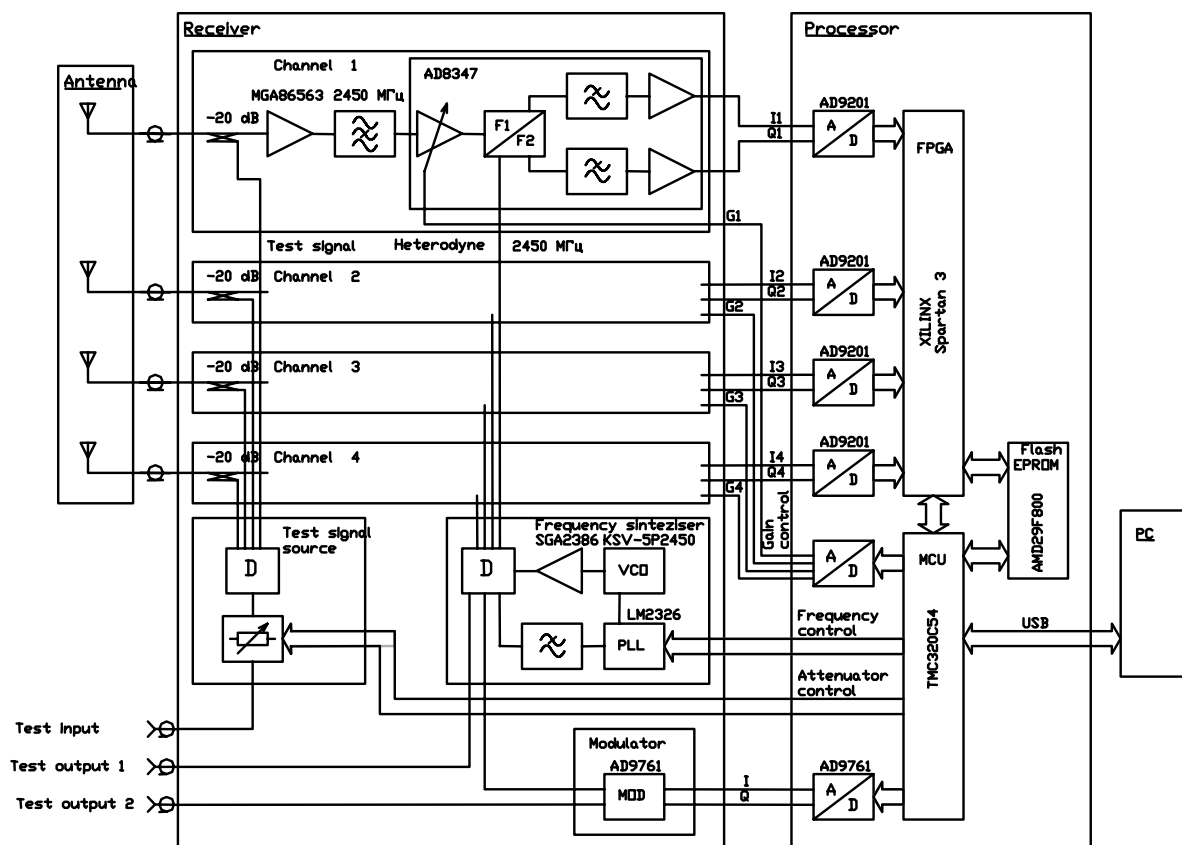


Рис.1. Структурная схема ЦАР

- определение весовых коэффициентов по заданным направлениям на нули и главный максимум и умножение их на входные сигналы с последующим суммированием взвешенных сигналов каждого канала;

- исследование влияния амплитудно-фазового разброса на характеристики формируемого луча и калибровка реального макета на требуемые уровни разброса.

Рассмотрим более подробно каждую из указанных задач.

Задача представления входных сигналов в виде комплексных величин в ЦДОС может быть решена посредством разложения входного сигнала на две квадратурные I - и Q -составляющие, которые легко представить в виде комплексного числа и выполнить их умножение на весовые коэффициенты. Наиболее просто и эффективно задача получения квадратурных составляющих может быть решена с использованием стандартных квадратурных демодуляторов AD8347 фирмы Analog Devices, которые позволяют получать низкочастотные квадратурные составляющие непосредственно из входного высокочастотного сигнала (в нашем случае это сигнал на частоте 2,45 ГГц).

После того как получены низкочастотные аналоговые квадратурные составляющие, их необходимо перевести в цифровой код для дальнейшей обработки в ЦДОС с наименьшими искажениями. Величина искажений низкочастотного сигнала при его аналого-цифровом преобразовании определяется количеством уровней квантования, т.е. разрядностью АЦП. Для определения вносимых АЦП искажений было проведено математическое моделирование формирования результирующей ДН при использовании АЦП с различной разрядностью. На рис.2 представлены результаты расчета ДН 4-элементной решетки с межэлементным расстоянием, соответствующим реальному макету, для непрерывного сигнала (сплошная линия), при наличии 2-разрядного АЦП в канале (штриховая линия) и при

наличии 5-разрядного АЦП (штрихпунктирная). Для формирования луча ДН на выходе сумматора достаточно оцифровывать входной сигнал с точностью до 5 бит квантования, поскольку кривая, соответствующая 5 битам квантования, практически не отличается от кривой для непрерывного сигнала в канале. Однако описанная ситуация справедлива только при наличии единственного сигнала на входе каждого канала. В случае двух сигналов, отличающихся по уровню (например на 20 дБ), необходимо добавить еще 4 бита, следовательно, требуется использовать АЦП как минимум с 9-ю разрядами. С этой точки зрения наиболее подходящим для создания действующего макета ЦАР является АЦП серии AD9201, предназначенный для оцифровки квадратурных составляющих сигналов с точностью 10 бит и скоростью 20MSPS. Кроме того, преимуществом использования такого АЦП является возможность его непосредственного подключения к выходам квадратурного демодулятора AD8347 без каких-либо дополнительных преобразований сигнала.

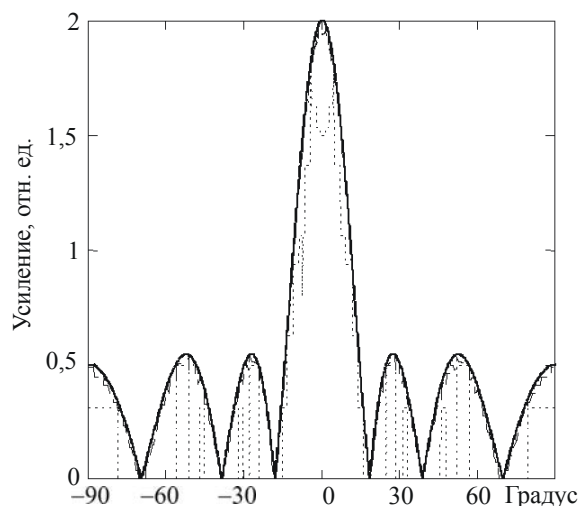


Рис.2. ДН, рассчитанные ЦАР: — непрерывный сигнал; ···· сигнал в канале, оцифрованный 2-мя разрядами; - · - 5-ю разрядами

Схема умножения и суммирования была реализована с использованием ПЛИС Spartan 3 фирмы Xilinx. Управление решеткой осуществляется посредством ЦСП ТМС320С54. В схеме умножения и суммирования происходит умножение принимаемого сигнала на весовые коэффициенты, которые определяются прямым вычислением, исходя из направления на сигнал и помеху, путем решения системы уравнений. В основе метода построения этой системы – свойство ДН решетки, заключающееся в том, что в направлении главного максимума ДН модуль взвешенной суммы комплексных чисел равен сумме модулей этих же чисел. При этом в направлениях на нули ДН эти взвешенные суммы равняются нулю.

Введем следующие обозначения:

- $z_i = e^{jkdx \sin(\theta_{null_i})}$, здесь θ_{null_i} – угловое направление нуля ДН, j – мнимая единица,

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, dx – межэлементное расстояние, $1 < i < N - 2$;

- $z_{Scan} = e^{jkdx \sin(\theta_{scan})}$, здесь θ_{scan} – угловое направление на главный максимум ДН;

- Δ – уменьшение амплитуды главного лепестка ДН;

- N – количество элементов в решетке.

В результате имеем систему N уравнений:

$$\begin{cases} |J_1| + |J_2 z_{Scan}| + \dots + |J_N (z_{Scan})^{N-1}| - |J_1 + J_2 z_{Scan} + \dots + J_N (z_{Scan})^{N-1}| = \Delta, \\ J_1 + J_2 z_{Scan} + \dots + J_N (z_{Scan})^{N-1} = (\sqrt{N} - \Delta) e^{j \arg(J_1 + J_2 z_{Scan} + \dots + J_N (z_{Scan})^{N-1})}, \\ J_1 + J_2 z_1 + \dots + J_N (z_1)^{N-1} = 0, \\ \dots \\ J_1 + J_2 z_{N-2} + \dots + J_N (z_{N-2})^{N-1} = 0, \end{cases}$$

где J_i – комплексная амплитуда тока на каждом элементе.

Таким образом, получена полная система нелинейных уравнений, которая может быть решена, например, методом Ньютона. Поскольку первые два уравнения определяют положение главного максимума, появляется возможность формирования $N-2$ нулей в требуемых направлениях для подавления помех, и мы имеем выражения для амплитудно-фазовых коэффициентов. Однако для повышения эффективности канала связи только одного подавления помехи недостаточно – необходимо обеспечить максимальное усиление полезного сигнала, что может быть реализовано за счет сохранения уровня усиления и положения главного максимума ДН решетки в направлении прихода полезного сигнала. Таким образом, возникает необходимость определения величины падения уровня главного максимума Δ при варьировании положения нуля во всем секторе обзора. На рис.3 представлены результаты расчета величины Δ для двух положений главного максимума: 0° (сплошная линия) и 25° (штриховая). Легко видеть, что практически во всем пространстве падение усиления составляет величину менее $1,5$ дБ, за исключением случаев попадания нуля в направление главного лепестка ДН решетки. Поэтому рассматриваемый метод определения коэффициентов оказывается весьма эффективным для пространственного разделения сигналов.

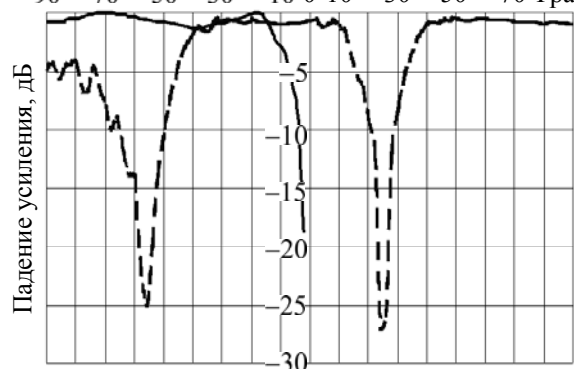


Рис.3. Зависимость падения усиления в главном лепестке ДН от углового положения формируемого нуля: — направление главного лепестка 0° ; --- 25°

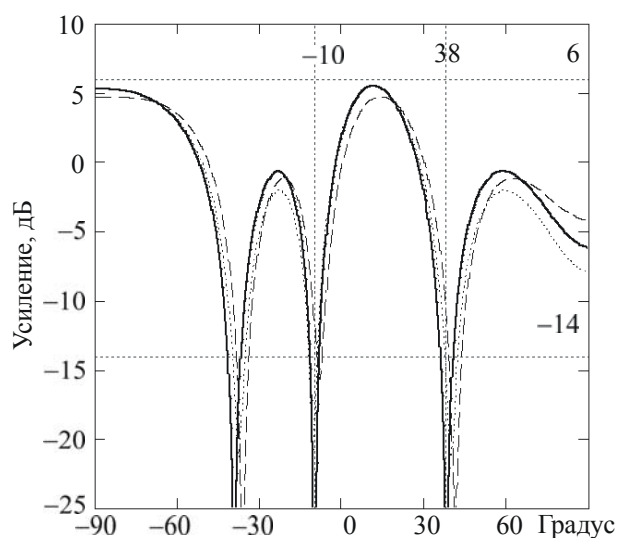


Рис.4. Влияние амплитудно-фазового разброса на формируемую ДН: — точные значения весовых коэффициентов; --- разброс амплитуд весовых коэффициентов 1 дБ, фаз -13° ; ···· разброс амплитуд весовых коэффициентов 0,7 дБ, фаз $-6,5^\circ$

Указанный выше метод формирования заданной ДН работает в предположении об идеальной идентичности каналов решетки, но в любой реальной системе существует амплитудно-фазовый разброс между каналами из-за неполной идентичности усилителей, схем преобразования частоты и т.д. Это приводит к неточностям в процессе установки положения главного максимума и минимумов («нулей») ДН и к изменению их уровней. Поэтому одной из задач в процессе определения требований к проектируемому макету системы пространственного разделения сигналов был расчет ДН ЦАР с учетом случайного амплитудного и фазового разбросов весовых коэффициентов. На рис.4 представлены результаты по расчету уровня «нуля» ДН для случаев точной установки коэффициентов (сплошная линия), для случайных разбросов ± 1 дБ по амплитуде и $\pm 13^\circ$ по фазе (штриховая линия) и $\pm 0,7$ дБ и $\pm 6,5^\circ$ (штрихпунктирная линия). Для формирования «нуля» ДН с глубиной до -20 дБ требуется, чтобы сигналы поступали

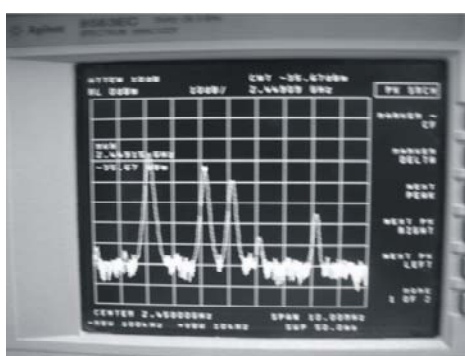
в схему суммирования с максимальным амплитудным разбросом не более $\pm 0,7$ дБ между каналами, а максимальный разброс по фазе составлял $\pm 6,5^\circ$. В связи с этим одной из важнейших задач при создании ЦАР является калибровка каналов на заданный разброс. Для осуществления калибровки в схеме каждого канала предусмотрены направленные ответвители, через которые один и тот же сигнал подается на все каналы. В качестве такого сигнала используется сигнал с выхода квадратурного модулятора AD8346, на вход которого подается низкочастотный сигнал с известной частотой, генерируемый в приемнике. После этого измеряется разброс между каналами на выходах АЦП, который компенсируется как с помощью автоматической регулировки усиления в AD8347, так и введением калибровочных коэффициентов непосредственно в схеме суммирования. Несмотря на некоторое усложнение цифрового приемника, преимущества такой схемы очевидны. Наличие опорного сигнала с достоверно известной частотой и амплитудой позволяет провести точное измерение разбросов амплитуды и фазы в каждом канале.

На последнем этапе работ над макетом были проведены испытания по пространственной фильтрации помехи. При этом испытания проводились по следующей схеме:

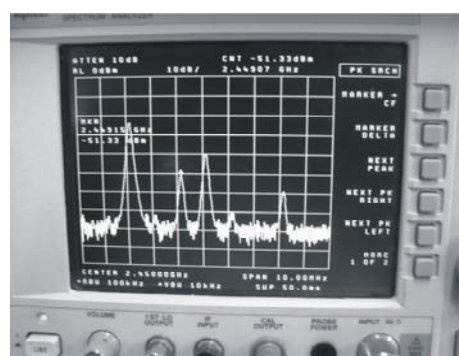
- в качестве источника полезного сигнала используется генератор немодулированного СВЧ-сигнала с частотой 2,45 ГГц (G1), в качестве источника помехи используется генератор немодулированного СВЧ-сигнала с частотой из рабочего диапазона $2,45 \pm 0,05$ ГГц (G2), при этом помеха приходит по направлениям боковых лепестков, а уровень сигнала помехи на выходе генератора может превышать уровень основного сигнала не более чем на 10 дБ;

- в качестве индикатора работы ЦАР используется анализатор спектра, при этом в процессе демонстрации возможны следующие состояния: включены оба генератора G1 и G2, при этом помеха приходит по направлению, строго отличному от направления основного сигнала, на индикаторе можно наблюдать наличие двух гармоник (рис.5,а); включен режим подавления помехи: на экране индикатора сигнал помехи ослаблен до уровня $-20...-30$ дБ по отношению к основному (рис.5,б).

В результате проведенных исследований на кафедре микροэлектронных радиотехнических устройств МИЭТ создан действующий прототип системы пространственного



а



б

Рис.5. Режимы работы ЦАР. Начальное состояние: основной сигнал и помеха имеют одинаковый уровень (а); пространственное подавление помехи (б)

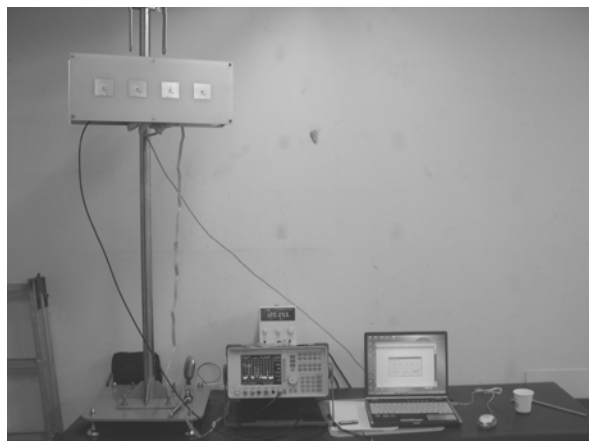


Рис.6. Внешний вид установки для испытаний ЦАР

подавления помехи на базе 4-элементной ЦАР, внешний вид которой представлен на рис.6. При этом в процессе создания макета был решен ряд конкретных задач:

- представлен входной сигнал в виде комплексных величин в ЦДОС;
- выбран АЦП с требуемой для обеспечения заданного динамического диапазона разрядностью;
- определены весовые коэффициенты по заданным направлениям на нули и главный максимум и выполнено их умножение на входные сигналы с последующим суммированием взвешенных сигналов каждого канала;
- исследовано влияние амплитудно-фазового разброса на характеристики формируемого луча и проведена калибровка реального макета на требуемые уровни разброса.

Литература

1. **De Robertis R.B., Rifaat R.** DSPs enhance flexible third-generation base-station design // Analog Dialogue 33-10. – 1999. – www.analog.com/library/analogDialogue/archives/33-10/dsparticle/index.html.
2. **Miura R., Tanaka T., Horie A., Karasawa Y.** A DBF self-beam steering array antenna for mobile satellite applications using beam-space maximal-ratio combination // IEEE transactions on vehicular technology. – 1999. – Vol. 48, N 3. – P. 3153–3158.
3. **Devlin M.** How to Make Smart Antenna // Xcell Journal. – 2003. – http://www.xilinx.com/publications/xcellonline/partners/xcell_nallatech45.htm.
4. **Beach M.A., Simmonds C.M., Howard P., Darwood P.** Smart antennas: an enabling technology for the wireless revolution // Proc. from «Millennium Conference on Antennas&Propagation». – Davos, Switzerland: 2000. 9–14 April.
5. **Derneryd A., Johannisson B.** Smart antennas for GSM and TDMA networks // Proc. from «Millennium Conference on Antennas&Propagation». – Davos, Switzerland: 2000. 9–14 April.
6. **Magill E.** Digital beamforming phased array transmit antenna // Proc. from «Millennium Conference on Antennas&Propagation». – Davos, Switzerland: 2000. 9–14 April.
7. Transmit-receive multibeam active adaptive array antenna for satellite communications / **A. Montesano, F. Monjas, A. Solana et al.** // Proc. from «Millennium Conference on Antennas&Propagation». – Davos, Switzerland: 2000. 9–14 April.

Чистюхин Виктор Васильевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой микросистемных радиотехнических устройств и систем (МРТУС) МИЭТ. *Область научных интересов:* антенно-фидерные устройства.

Лялин Константин Сергеевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры МРТУС МИЭТ. *Область научных интересов:* антенно-фидерные устройства.

Сизов Владимир Иванович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры МРТУС МИЭТ. *Область научных интересов:* цифровая обработка сигналов.

Кочетков Василий Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники МИЭТ. *Область научных интересов:* цифровая обработка сигналов.

Система ФАПЧ на цифровых логических элементах

Д.В.Зиновьев

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Рассмотрены вопросы разработки системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), предназначенной для формирования синхросигналов в 32-разрядных процессорах. Особенностью системы является ее исполнение только на цифровых логических элементах. Приведена передаточная функция полностью цифровой системы ФАПЧ, которая может быть использована для определения условий стабильности системы ФАПЧ при разработке ее отдельных функциональных блоков.

В настоящее время в процессорах широкое распространение получила система распределенного формирования синхросигналов. Система состоит из ведущей системы ФАПЧ, расположенной, как правило, в центре кристалла интегральной схемы, и ведомых систем ФАПЧ и фазовых детекторов, распределенных по всей площади кристалла [1].

Рабочие характеристики и конструктивные параметры аналоговых систем ФАПЧ не позволяют их применять в системах распределенного формирования синхросигналов. Такие системы ФАПЧ чувствительны к помехам по цепям питания и занимают значительную площадь.

Для использования в распределенных системах формирования синхросигналов наиболее подходящими системы ФАПЧ, выполненные полностью на цифровых логических элементах (ПЦ ФАПЧ). Они менее чувствительны к помехам по цепям питания, занимают меньшую площадь на кристалле и обладают рядом других достоинств. Рассмотренная в работе ПЦ ФАПЧ отличается простотой реализации и выполнена только на цифровых логических элементах.

Полностью цифровая система ФАПЧ. Полностью цифровая система ФАПЧ состоит из частотно-фазового детектора, преобразователя фазовой ошибки в цифровой код, цифрового фильтра нижних частот, генератора, перестраиваемого цифровым кодом, делителя частоты перестраиваемого генератора в цепь обратной связи (рис. 1).

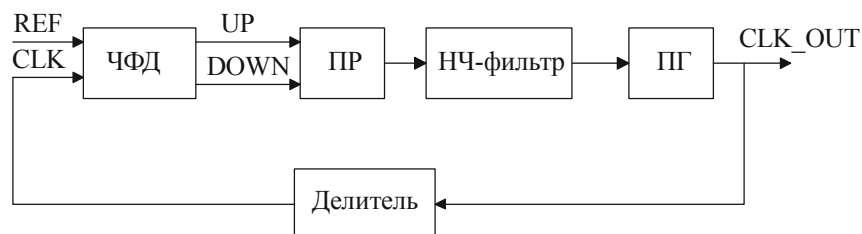


Рис. 1. Функциональная схема ПЦ ФАПЧ. Используемые обозначения: ЧФД – частотно-фазовый детектор, ПР – преобразователь фазовой ошибки в цифровой код, ПГ – перестраиваемый генератор, REF – сигнал опорного генератора, CLK – сигнал с выхода делителя, CLK_OUT – сигнал с выхода перестраиваемого генератора

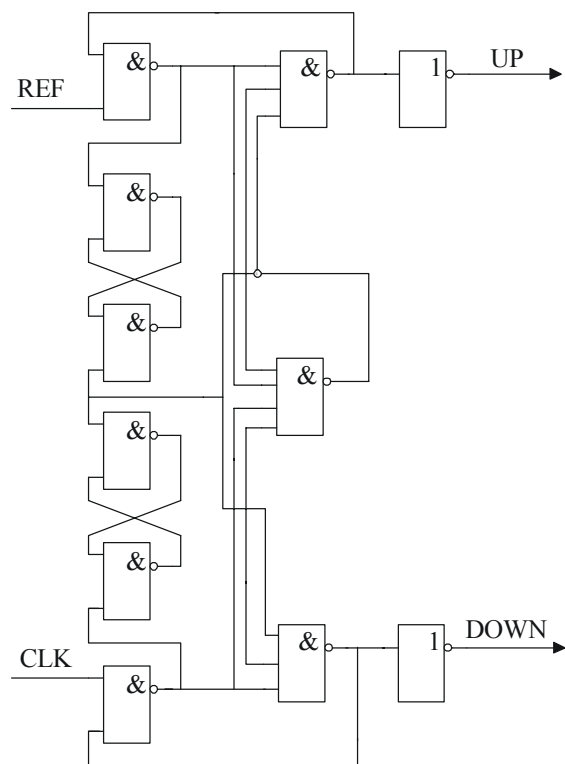


Рис.2. Частотно-фазовый детектор

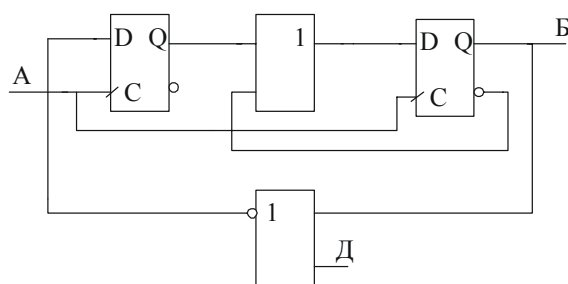


Рис.3. ДПКД с коэффициентами деления 2:3

По функциональному назначению блоков полностью цифровая система ФАПЧ сходна с аналоговой системой, использующей цифровой частотно-фазовый детектор. Отличие заключается только в одном блоке. В полностью цифровой системе для преобразования фазовой ошибки в цифровой код применяется схема счетчиков, тактируемая сигналом с выхода перестраиваемого генератора, а в аналоговой системе – схема «токового насоса». Рассмотрим функциональные блоки ПЦ ФАПЧ.

Частотно-фазовый детектор. В ПЦ ФАПЧ использован импульсный частотно-фазовый детектор (ЧФД) с тремя состояниями (рис.2). Этот детектор выполнен на четырех RS-триггерах. Два RS-триггера реализованы на элементах 2И-НЕ, другие два – на элементах 2И-НЕ и 3И-НЕ. Элемент 4И-НЕ необходим для формирования внутреннего сигнала сброса всей схемы.

На вход «CLK» подается сигнал с выхода делителя в цепи обратной связи системы ФАПЧ, на вход «REF» – сигнал с выхода опорного генератора.

Если отрицательный фронт сигнала опорного генератора отстает от отрицательного фронта сигнала с выхода делителя в цепи обратной связи, то на выходе «UP» устанавливается логический «0», а на выходе «DOWN» установится логическая «1». В противном случае на выходе «UP» устанавливается логическая «1», а на выходе «DOWN» установится логический «0».

Схема импульсного частотно-фазового детектора – асинхронная схема, требующая моделирования на транзисторном уровне.

Многомодульный делитель частоты. Схема многомодульного делителя в цепи обратной связи ПЦ ФАПЧ выполнена на четырех делителях с переменным коэффициентом деления (ДФКД) (рис.3).

Необходимые коэффициенты деления определяются частотой опорного генератора и требуемым диапазоном выходных частот ПЦ ФАПЧ. Выбрав ДПКД с коэффициентами деления 2 и 3, можно получить набор коэффициентов деления от 16 до 31 с шагом 1. Задание требуемого коэффициента деления выполняется установлением соответствующего кода на шине управления Д. Код на этой шине связан с получаемым коэффициентом деления:

$$K_{\text{д}} = 16 + D_0 \cdot 2^0 + D_1 \cdot 2^1 + D_2 \cdot 2^2 + D_3 \cdot 2^3,$$

где D_3, D_1, D_2, D_0 – переменные, обозначающие значение на шине управления схемы делителя в бинарном коде.

НЧ-фильтр. В качестве фильтра нижних частот в ПЦ ФАПЧ применен рекурсивный фильтр первого порядка с передаточной функцией вида

$$H(z) = \frac{1 - 0,5z^{-1}}{1 - z^{-1}}. \quad (1)$$

Для реализации этого фильтра необходимо два регистра и два сумматора. Их разрядность определяется исходя из разрядности преобразователя фазовой ошибки в цифровой код. Операция умножения на коэффициент 0,5 выполняется сдвигом вправо на один разряд.

Преобразователь фазовой ошибки в цифровой код. Преобразователь фазовой ошибки в цифровой код выполнен на реверсивном счетчике. Этот счетчик тактируется как положительными, так и отрицательными фронтами сигнала перестраиваемого генератора. На вход разрешения счета подаются сигналы «UP» и «DOWN». Эти же сигналы определяют направление счета. Сигнал сброса счетчика в нулевое состояние формируется из сигнала сброса частотно-фазового детектора.

Если сигнал «UP» находится в состоянии логическая «1», то счетчик выполняет операцию декремента, в противном случае – операцию инкремента. Состояние реверсивного счетчика по завершению счета пропорционально длительности импульсов «UP» или «DOWN». Длительность этих импульсов определяется значением фазовой ошибки между двумя сигналами, поступающими на входы частотно-фазового детектора.

При вхождении ПЦ ФАПЧ в режим синхронизма значение периода колебаний перестраиваемого генератора $T_{ПГ}$ может меняться в широких пределах. Это приведет к тому, что значения реверсивного счетчика при одной и той же длительности импульсов «UP» или «DOWN» будут различны.

Результаты моделирования ПЦ ФАПЧ показали, что при диапазоне рабочих частот перестраиваемого генератора от 200 до 300 МГц этими различиями можно пренебречь.

Перестраиваемый генератор. За основу перестраиваемого генератора был взят кольцевой генератор на недифференциальных элементах задержки. В качестве этих элементов использованы логические инверторы. Частота колебаний $f_{к.г}$ такого генератора определяется следующим образом:

$$f_{к.г} = \frac{1}{2\pi T_{зад} N_{инв}},$$

где $N_{инв}$ – число инверторов в генераторе; $T_{зад}$ – время переключения инвертора.

Перестраиваемый генератор состоит из основной цепочки инверторов А и шестнадцати дополнительных цепочек Д1 – Д16 инверторов с третьим (высокоомным) состоянием (рис.4). Основная цепочка содержит восемь инверторов HE1 – HE8 и один элемент И-НЕ, на один из входов которого подается сигнал разрешения работы «Enable». Дополнительные цепочки подключены параллельно основной цепочке инверторов. В случае если на управляющем входе «У» такого элемента логический «0», то на его выходе – третье состояние; если на управляющем входе логическая «1», то такой элемент функционирует как инвертор.

Перестройка частоты в этом генераторе выполняется за счет изменения числа элементов в дополнительных цепочках, на выходе которых установлено третье состояние. Когда на выходе всех этих элементов установлено третье состояние, частота колебаний перестраиваемого генератора будет максимальной.

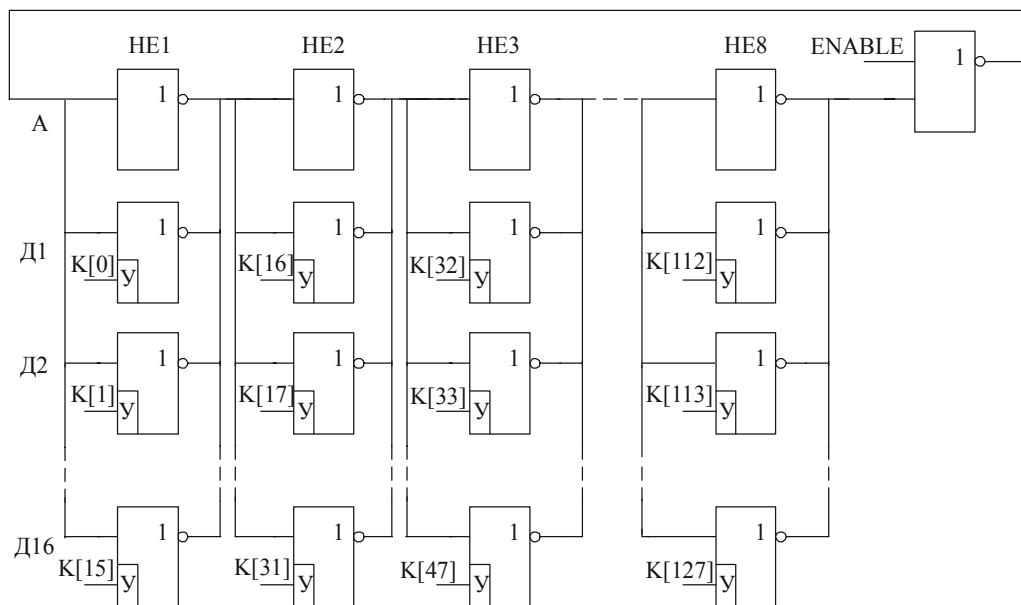


Рис. 4. Перестраиваемый цифровым кодом кольцевой генератор

Передаточная функция ПЦ ФАПЧ. В области дискретного времени цифровую систему удобно описывать разностными уравнениями. Наиболее удобным методом описания дискретных систем является z -преобразование:

$$X(z) = \sum_{n=0}^{\infty} x(n) \cdot z^{-n}.$$

Такое преобразование делает возможным заменить решение линейных разностных уравнений решением алгебраических. Применение z -преобразования для решения разностных уравнений аналогично использованию преобразования Лапласа для решения дифференциальных уравнений. Составим передаточные функции блоков, входящих в состав ПЦ ФАПЧ.

Перестраиваемый генератор. Перестраиваемый цифровым кодом генератор представляет собой замкнутую цепь из нечетного числа инверторов. Значение фазы $\Phi(n)$ кольцевого генератора в момент времени n запишем как сумму значения фазы в момент времени $(n - 1)$ и добавочного значения фазы, определяемого цифровым кодом $D(n)$ в момент времени n :

$$\Phi(n) = \Phi(n - 1) + K_{\text{ПГ}} D(n). \quad (2)$$

Используя z -преобразование, получим

$$H_{\text{ПГ}}(z) = \frac{K_{\text{ПГ}}}{1 - z^{-1}}, \quad (3)$$

где $K_{\text{ПГ}}$ – крутизна перестраиваемого генератора, которая обратно пропорциональна среднему значению изменения частоты колебаний генератора при изменении управляющего кода на единицу младшего разряда. Ее можно определить, если известны диапазон рабочих частот $\Delta f_{\text{ПГ}}$ и разрядность шины управления K перестраиваемого генератора:

$$K_{\text{ПГ}} = \frac{2^K}{\Delta f_{\text{ПГ}}}. \quad (4)$$

Частотно-фазовый детектор. Передаточная функция частотно-фазового детектора имеет вид

$$H_{\text{чФД}}(z) = K_{\text{чФД}} z^{-1}. \quad (5)$$

Задержка на один такт означает, что в текущий момент времени состояние частотно-фазового детектора отражает разницу фаз сигналов на его входе в предыдущий момент времени. Реверсивный счетчик преобразователя фазовой ошибки в цифровой код тактируется положительным и отрицательным фронтом сигнала перестраиваемого генератора. Точность такого преобразования по времени равна.

Коэффициент $K_{\text{чФД}}$ определяется выражением

$$K_{\text{чФД}} = \frac{2}{T_{\text{ПГ}}}. \quad (6)$$

Делитель. Передаточная функция схемы делителя в цепи обратной связи имеет вид

$$H(z) = \frac{1}{N_{\text{дел}}}. \quad (7)$$

НЧ-фильтр. Передаточная функция используемого нами фильтра нижних частот приведена выше (формула (1)). Зная передаточные функции (1) – (7), запишем передаточную функцию ПЦ ФАПЧ:

$$H_{\text{ПЦ ФАПЧ}}(z) = \frac{N_{\text{дел}} K_{\text{чФД}} K_{\text{ПГ}} (1 - 0,5z^{-1})}{N_{\text{дел}} (1 - z^{-1})^2 + K_{\text{чФД}} K_{\text{ПГ}} z^{-1} (1 - 0,5z^{-1})}. \quad (8)$$

Характеристическое уравнение этой передаточной функции имеет вид

$$N_{\text{дел}} (1 - z^{-1})^2 + K_{\text{чФД}} K_{\text{ПГ}} z^{-1} (1 - 0,5z^{-1}) = 0. \quad (9)$$

Выполнив подстановки из (6), получим

$$N_{\text{дел}} (1 - z^{-1})^2 + 2 \left(\frac{K_{\text{ПГ}}}{T_{\text{ПГ}}} \right) z^{-1} (1 - 0,5z^{-1}) = 0. \quad (10)$$

Для того чтобы система ПЦ ФАПЧ была стабильной, необходимо, чтобы решения характеристического уравнения располагались в единичной z -окружности:

$$\frac{-2 \left(\frac{K_{\text{ПГ}}}{T_{\text{ПГ}}} - N_{\text{дел}} \right) \pm \sqrt{2 \left(\frac{K_{\text{ПГ}}}{T_{\text{ПГ}}} \right) \left(\frac{K_{\text{ПГ}}}{T_{\text{ПГ}}} + 1 \right) - 8 N_{\text{дел}} \left(\frac{K_{\text{ПГ}}}{T_{\text{ПГ}}} - N_{\text{дел}} \right)}}{8 N_{\text{дел}} - 2 \left(\frac{K_{\text{ПГ}}}{T_{\text{ПГ}}} \right)} < 1. \quad (11)$$

Особенностью перестраиваемых кольцевых генераторов является нелинейность крутизны $K_{\text{ПГ}}$ на всем диапазоне рабочих частот. К тому же, как отмечалось выше, при вхождении в режим синхронизма значение $T_{\text{ПГ}}$ может меняться в широких пределах.

При разработке ПЦ ФАПЧ и анализе ее работы выражение (11) следует использовать для определения области допустимых значений двух конструктивных параметров системы $N_{\text{дел}}$ и $K_{\text{ПГ}}$. Значение $T_{\text{ПГ}}$ будет находиться в диапазоне $\left[\frac{1}{f_{\text{max}}}, \dots, \frac{1}{f_{\text{min}}} \right]$, где

f_{max} и f_{min} определяют диапазон рабочих частот $\Delta f_{\text{ПГ}}$ перестраиваемого генератора.

Рассмотренная в работе цифровая система ФАПЧ содержит преобразователь фазовой ошибки в цифровой код. Преобразователь выполнен только на цифровых логических библиотечных элементах, что значительно упрощает его применение и позволяет разработать полностью синтезальное Verilog описание ПЦ ФАПЧ.

Традиционно ПЦ ФАПЧ выполняются как бесфильтровые системы [2]. Использование преобразователя фазовой ошибки в цифровой код позволит включать в состав ПЦ ФАПЧ фильтры нижних частот, что обеспечит улучшение шумовых свойств выходных колебаний.

Литература

1. *Tam S. et al.* Clock Generation and Distribution for the First IA-64 Microprocessor //IEEE JSSC. – 2000. – P. 1545–1552.
2. *Malshin Alexander V., Esakov Igor A., Gaidiukov Alexei A., Postavnoy Alexander A.* Xavier Gense Avanti's Libra-Passport helps international team design portable, all-digital phase locked loop // Electronics journal. – Jan/Feb 2001. – P. 31–35.

Зиновьев Денис Владимирович – аспирант кафедры интегральной электроники и микросистем МИЭТ. *Область научных интересов:* проектирование аналогово-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей, цифровая обработка сигналов.

**Международная научно-техническая конференция
«Информационные технологии в науке, технике и образовании»**

Республика Абхазия, Пицунда (20 сентября – 1 октября 2006 года)

Тематика конференции

- Авиационно-космические технологии и приборы
- Акусто- и магнитоэлектронные технологии в науке, технике и образовании
- Гидрофизика и морское приборостроение
- Информационные технологии в образовании
- Космический мониторинг окружающей среды, вопросы экологии
- Моделирование технологических систем и процессов
- Медицинское приборостроение
- Новые материалы и технологии в приборо- и машиностроении
- Обеспечение качества и надежности приборов и аппаратуры
- Стойкость материалов и приборов к воздействию деструктивных внешних факторов, включая радиацию
- Физика и техника плазмы, плазменные технологии
- Физические процессы в материалах, структурах и приборах микро-, нано- и оптоэлектроники

Предложения по расширению тематики как со стороны организаций, так и отдельных представителей будут учтены.

Организаторы: Академия инженерных наук им. А.М. Прохорова (АИН РФ), Государственное научно-производственное объединение «Сухумский физико-технический институт» (ГНПО «СФТИ»), Военно-топографическое управление Генерального Штаба МО РФ, Московский государственный университет приборостроения и информатики, Московский государственный институт электронной техники (технический университет) и др.

Председатель Оргкомитета – вице-президент и действительный член Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова д-р, физ.-мат. наук, проф., лауреат Государственной премии СССР, заслуженный деятель науки РФ Кубарев Юрий Васильевич.

Ответственный секретарь – Трубицын Александр Константинович, Госдума РФ.

e-mail: aou@duma.gov.ru Тел.: (495) 692-68–54

МИКРОСИСТЕМЫ

УДК 681.586'325

Методы расширения диапазона измерений угловых скоростей микромеханических гироскопов ADXRS150, ADXRS300

А.В.Комиссаров

НИИ вычислительных средств и систем управления МИЭТ

Н.В.Степанов

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Дано краткое описание основных характеристик и принципа работы микромеханических датчиков угловой скорости (гироскопов) ADXRS150 и ADXRS300 фирмы Analog Devices. Рассмотрены три метода расширения диапазона измерений угловых скоростей для этих устройств. Приведены достоинства и недостатки данных методов. Полученные результаты можно использовать в работах по созданию миниатюрных инерциальных навигационных систем, которые применяются на подвижных или носимых объектах.

В 2002 году фирма Analog Devices впервые в мире на базе технологии iMEMS (технологии микромеханики) приступила к производству интегральных гироскопов – устройств, интегрирующих на одном кремниевом кристалле датчик угловой скорости и электронику, обеспечивающую формирование и предварительную обработку сигнала. Цель создания интегральных гироскопов – замена сложных механических устройств инерциальных систем управления различными объектами на микроминиатюрные приборы, изготавливаемые по интегральной технологии. Чтобы оценить возможности данного класса микромеханических систем, перечислим характеристики данных устройств.

Гироскопы делятся на два основных класса: свободные гироскопы (астатические, хранящие заданное направление) и датчики угловой скорости (ДУС), к которым относятся гироскопы iMEMS. Для астатических гироскопов основным показателем точности является остаточная скорость ухода, тогда как точность датчиков угловой скорости характеризуется погрешностью измерения угловой скорости. Для того чтобы получить данные об угловом положении из данных об угловой скорости, необходимо провести интегрирование, которое приводит к быстрому нако-

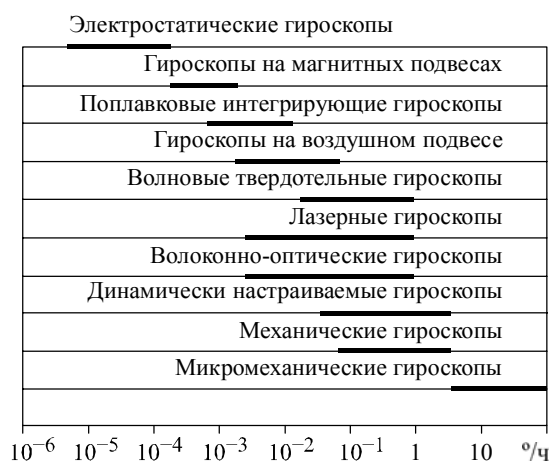


Рис.1. Остаточная скорость ухода гироскопов различных типов

© А.В.Комиссаров, Н.В.Степанов, 2006

плению погрешности. На рис.1 приведена диаграмма со сводными данными о достигнутых показателях точности гироскопов, построенных на различных физических принципах [1]. Как видно из диаграммы, микромеханические гироскопы занимают несколько особое положение. Скорость ухода микромеханических гироскопов составляет порядка $10^{\circ}/ч$ и более. Поэтому гироскопы iMEMS предназначены для применения в тех устройствах, где интервалы автономной работы гироскопа достаточно малы, т.е. коррекция проводится достаточно часто или непрерывно.

Тем не менее, несмотря на меньшую в сравнении с другими гироскопами точность, микромеханические гироскопы iMEMS обладают рядом уникальных достоинств. Прежде всего, это малые габариты и масса, во много раз меньшие, чем у любого другого гироскопа. Датчики угловой скорости типа ADXRS150 и ADXRS300 выпускаются в миниатюрных корпусах размером $7 \times 7 \times 3$ мм с выводами в виде матрицы шариков (BGA). Вес такого прибора не превышает 0,5 г. Рекордно низкие массогабаритные показатели чувствительных элементов, обеспечиваемые микромеханической технологией iMEMS, сочетаются с интеграцией всех необходимых электронных схем обработки сигнала в одной микросхеме.

Важнейший для портативных автономных устройств параметр – это энергопотребление. Гироскопы ADXRS150 и ADXRS300 фирмы Analog Devices потребляют ток 5 мА при номинальном напряжении питания 5 В. Этот параметр у гироскопов iMEMS сильно отличается в меньшую сторону по сравнению с другими гироскопами. Кроме того, гироскопы iMEMS отличаются высокой надежностью. В данных приборах для повышения надежности (впервые в коммерчески доступных гироскопах данного класса) предусмотрена встроенная система полного механического и электронного автотестирования, которая функционирует без необходимости отключения датчиков. Достигнутые характеристики постоянно повышаются благодаря совершенствованию технологии iMEMS.

Рассмотрим более подробно микрогироскоп iMEMS. Микромеханический датчик представляет собой колебательную систему на основе некоторой инерционной массы.

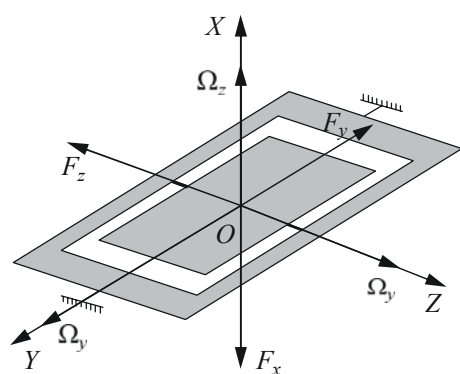


Рис.2. Схема микрогироскопа карданного типа

Частота колебаний такого «вибрационного гироскопа» зависит от угловой скорости вращения подложки, на которой размещены микромеханические элементы устройства.

На рис.2 приведена схема микрогироскопа, где (O, X, Y, Z) – система координат, связанная с корпусом прибора. На схеме показаны вектор переменной во времени угловой скорости $\Omega = \Omega(t)$, который задан своими проекциями на соответствующие оси системы координат $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$, и вектор переменной по времени силы Кориолиса $F = F(t)$, который задан проекциями F_x, F_y, F_z .

Угловая скорость вращения основания Ω_x влияет на изменение собственных частот чувствительного элемента гироскопа благодаря действию составляющих силы Кориолиса F_x, F_y, F_z .

На рис.3 приведены графики, характеризующие зависимость собственной частоты колебания внутренней и наружной рамок (p_1 и p_2) от угловой скорости основания Ω_x для гироскопа с несовпадающими исходными частотами собственных колебаний. Данные зависимости получены расчетным путем для некоторых заданных параметров датчика (габаритов, жесткости торсионов и др.) [2].

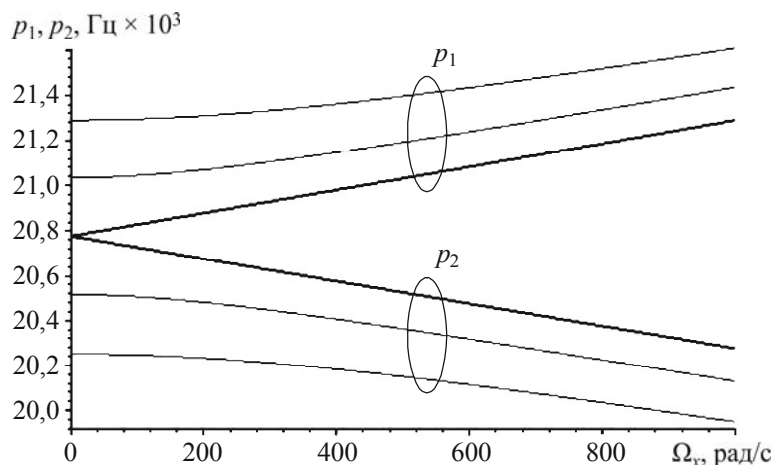


Рис.3. Зависимость собственной частоты гироскопа от угловой скорости для трех вариантов конструкции датчиков

В определенном диапазоне угловых скоростей Ω_x от 0 до 1000 рад/с, при исходном равенстве частот данная зависимость практически линейно зависит от угловой скорости основания. Это свойство можно использовать для получения информации об угловой скорости основания.

Высокочастотный сигнал с емкостного датчика поступает на каскады усиления и демодуляции. В итоге на выходе микросхемы получаем сигнал напряжения, пропорциональный угловой скорости (рис.4). Наличие внутри микросхемы двух перпендикулярно расположенных однотипных датчиков позволяет избежать влияния на выходной сигнал гироскопа вибрации и ускорения. Схемы формирования сигнала, расположенные на этом же кристалле, позволяют сохранить качество сигнала в условиях «шумного» окружения (электромагнитных помех, шумов цифровых схем и т.д.).

Максимальная детектируемая скорость вращения (т.е. динамический диапазон датчика угловой скорости) составляет у гироскопов ADXRS150 и ADXRS300 соответственно 150 и 300 °/с. Но это не означает, что измерение более высокой или более низкой скорости вращения нельзя выполнять с помощью данных устройств. В руководстве

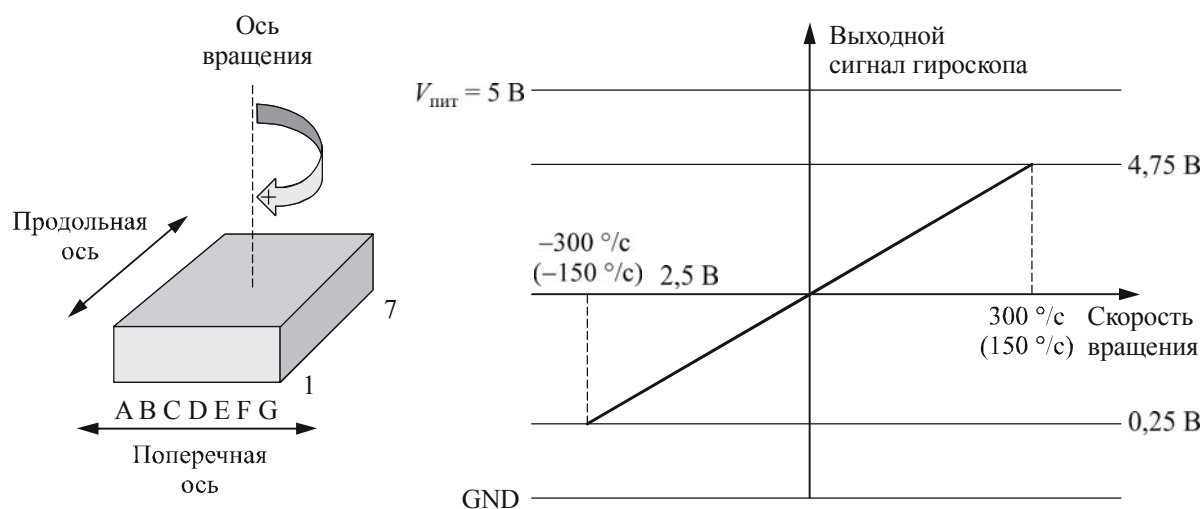


Рис.4. Сигнал угловой скорости на выходе гироскопа iMEMS

по применению AN-625 [3] указывается, каким образом можно изменить динамический диапазон гироскопа в сторону увеличения или уменьшения в зависимости от требований задачи.

Данный прибор имеет встроенную схему автотестирования с цифровым управлением, которая работает одновременно с остальными элементами датчика. В составе микросхемы присутствует датчик температуры для калибровки устройства и компенсации погрешности, вызванной изменением температуры, также на кристалле имеется прецизионный источник опорного напряжения. Приведем основные параметры гироскопов ADXRS150 и ADXRS300: диапазон измерений ± 150 °/с и ± 300 °/с соответственно; плотность шума $0,05$ °/с/ $\sqrt{\text{Гц}}$; полоса частот 40 Гц.

Для схемы возбуждения чувствительных элементов требуется напряжение питания 14–16 В. Так как на микросхему подается напряжение 5 В, для получения более высокого напряжения питания на кристалле имеется схема «зарядового насоса» с переключаемыми конденсаторами (рис.5). Если внешнее напряжение питания составляет 14–16 В, то можно использовать непосредственно это напряжение и при этом избавиться от необходимости подключения нескольких дополнительных внешних конденсаторов.

Опишем различные способы изменения динамического диапазона измерения скоростей данными микромеханическими гироскопами. Гироскопы ADXRS150 и ADXRS300 имеют динамический диапазон ± 150 °/с и ± 300 °/с соответственно. В некоторых случаях может понадобиться другой динамический диапазон или коэффициент масштабирования сигнала (фактор масштаба) отличный от того, который предлагается.

В настоящей статье рассматриваются три метода, которые могут использоваться для расширения динамического диапазона измеряемых угловых скоростей до нескольких тысяч градусов в секунду.

Если цель состоит в том, чтобы увеличить фактор масштаба (например, для прибора ADXRS150), то можно добавить усилительную схему (рис.6). Явный недостаток такого решения в том, что требуется несколько внешних компонентов.

Более простым альтернативным решением является подключение между выводами CMID и SUMJ внешнего резистора. Таким образом, можно увеличить усиление на

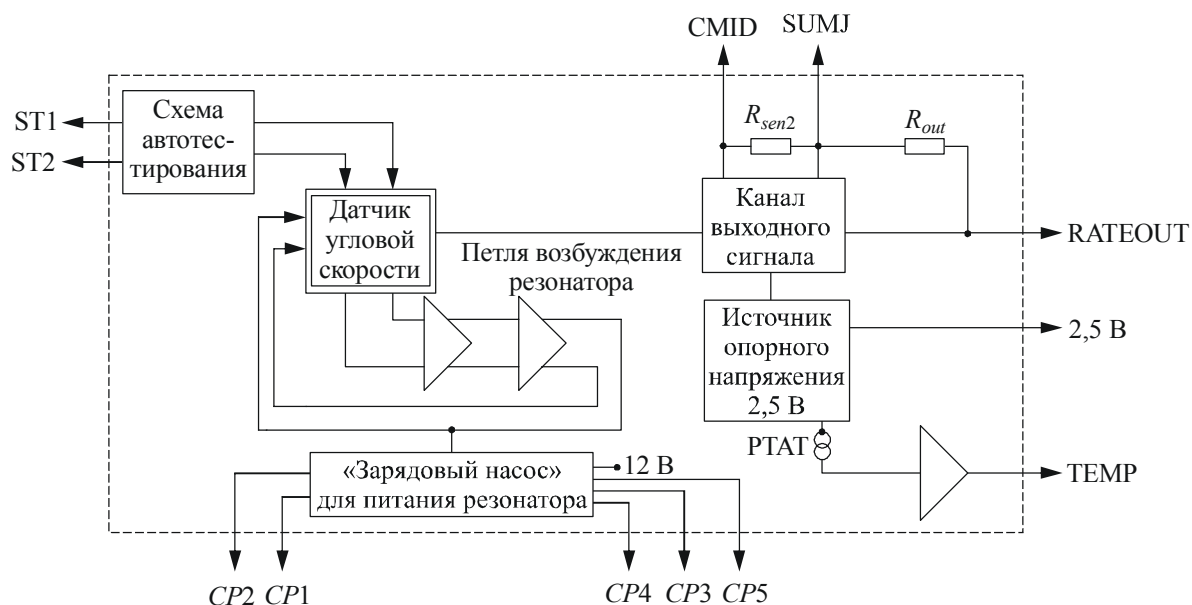


Рис.5. Структурная схема гироскопа iMEMS с внешними элементами

выходе за счет уменьшения значения R_{sen2} . Внутри кристалла омическое сопротивление R_{sen2} изменяется в пределах $\pm 35\%$. Следовательно, разработчик, использующий данный метод изменения диапазона, должен тщательно регулировать значение внешнего резистора, чтобы достичь заданного значения чувствительности.

Если требуется умеренное расширение динамического диапазона (увеличение фактора масштаба в четыре раза или меньше), можно применять метод, заключающийся в добавлении резистора R_{ext} между выводами SUMJ и RATEOUT (см. рис.5). Это уменьшит коэффициент усиления на выходе. В табл.1 приведены экспериментальные данные, предоставленные фирмой «Analog Devices» [3], демонстрирующие зависимость изменяемого динамического диапазона от сопротивления резистора R_{ext} . Данная зависимость, например для ADXRS150, аппроксимируется следующей функцией:

$$RANGE_{new} = \left(\frac{27228}{R_{ext}} + 149,2 \right),$$

где R_{ext} – сопротивление внешнего резистора между выводами CMID и SUMJ.

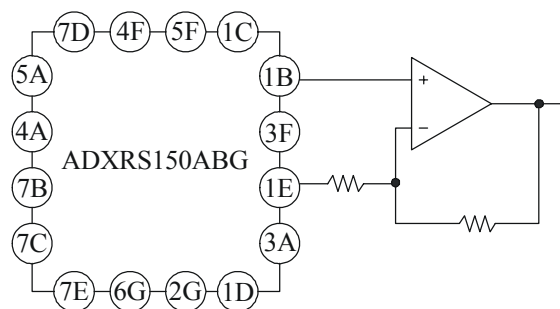


Рис.6. Схема подключения усилителя

Таблица 1

Зависимость динамического диапазона от сопротивления внешнего резистора

R_{ext} , кОм	ADXRS150		ADXRS300	
	Диапазон, %/с	Масштаб, мВ/°/с	Диапазон, %/с	Масштаб, мВ/°/с
536	200	9,4	400	3,7
267	250	7,5	500	3,0
178	300	6,2	600	2,5
133	350	5,3	700	2,1
107	400	4,7	800	1,9
88,7	450	4,1	900	1,7
76,8	500	3,7	1000	1,5
66,5	550	3,4	1100	1,4
60,4	600	3,1	1200	1,3

На рис.7 показаны результаты сравнения аппроксимирующей функции и экспериментальных данных. В табл.1 также приведены экспериментальные данные, отражающие зависимость измененного фактора масштаба от значения внешнего резистора R_{ext} . Эти данные аппроксимируются следующей функцией:

$$SCALE_{new} = 12,5 \cdot R_{ext}^{1/8} - 17,8.$$

Результаты аппроксимации приведены на рис.8.

Следует отметить, что внутренний резистор R_{out} между выводами SUMJ и RATEOUT изготовлен с использованием лазерной подгонки номинала с целью достижения точности коэффициента усиления $\pm 1\%$.

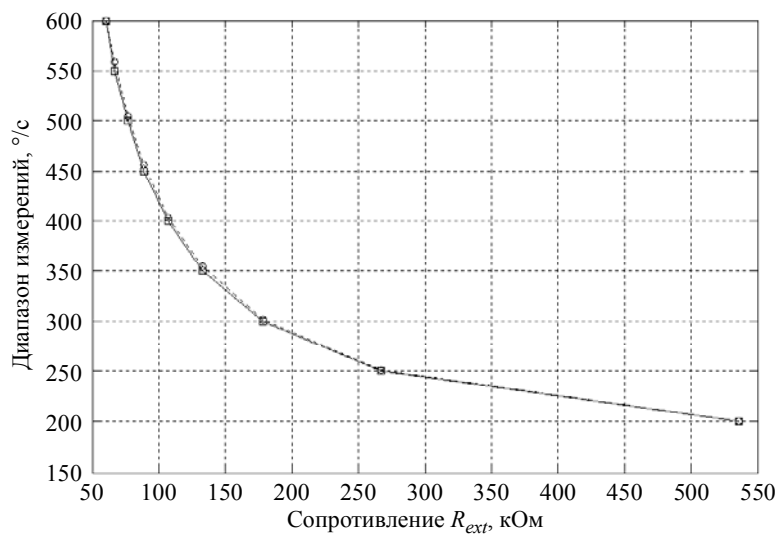


Рис. 7. Зависимость диапазона измерения угловых скоростей от сопротивления внешнего резистора для гироскопа ADXRS150: \square – эксперимент; \circ – аппроксимация

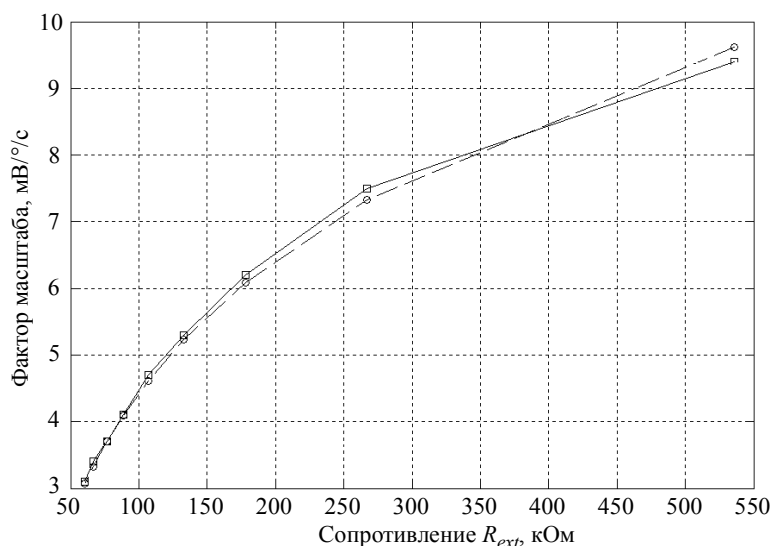


Рис. 8. Зависимость фактора масштаба от сопротивления внешнего резистора для гироскопа ADXRS150: \square – эксперимент; \circ – аппроксимация

Данный способ имеет два основных недостатка: уменьшение сопротивления обратной связи наряду с усилением на выходе микросхемы приводит к увеличению температурного дрейфа гироскопа ($2^\circ/\text{с}$ при температуре от -40 до $+85^\circ\text{C}$); начальное нулевое смещение может несколько измениться. Разработчик может контролировать это смещение, используя методы начальной настройки, описанные в технической документации фирмы-изготовителя [4].

Если требуется очень широкий динамический диапазон, частота колебаний резонатора гироскопа должна быть уменьшена. Это достигается устранением конденсаторов, подключенных к выводам $CP1/CP2$ и $CP3/CP4$, и применением фиксированного напряжения U_{CP5} в цепи вывода $CP5$. Любое напряжение ниже 12 В , поданное на вывод $CP5$, приведет к уменьшению фактора масштаба. В табл. 2 приведены некоторые экспериментальные данные, полученные с использованием гироскопа ADXRS150 [3].

Таблица 2

Фактор масштаба для различных значений U_{CP5}

U_{CP5} , В	Масштаб, мВ/°/с	Диапазон, °/с
5	0,27	5500
6	0,56	2600
7	1,02	1400
8	1,72	900

Отметим, что используемое напряжение U_{CP5} должно быть достаточно стабильным, так как любое его изменение приводит к изменению в факторе масштаба. Разработчик должен калибровать как ноль выхода (начальные настройки), так и чувствительность каждого изготовленного образца.

Если требуется динамический диапазон измерения угловых скоростей больше, чем 5000 °/с, можно использовать комбинацию методов, например добавление внешнего резистора и уменьшение напряжения U_{CP5} . Используя гироскоп ADXRS300 с внешним резистором 60 кОм и $U_{CP5} = 5$ В, можно теоретически достигнуть динамического диапазона примерно в 50000 °/с.

Гибкость структуры гироскопов ADXRS150 и ADXRS300 позволяет реализовать достаточно широкий выбор факторов масштаба, необходимый пользователю. Однако любое добавление внешнего элемента или изменение напряжения U_{CP5} требует от пользователя дополнительной калибровки нуля выхода и чувствительности гироскопа.

Литература

1. **Власенко А.** Интегральные гироскопы iMEMS – датчики угловой скорости фирмы Analog Devices // Электронные компоненты. – 2003. – № 2. – С. 57–59.
2. **Поголов А.И., Тимошенко В.П., Тимошенко С.П., Чаплыгин Ю.А.** Разработка микрогироскопов на основе многослойных структур кремния и стекла // Микросистемная техника. – 1999. – № 1. – С. 36–41.
3. **Harvey Weinberg.** Modifying the Range of the ADXRS150 and ADXRS300 Rate Gyros Application Note (AN-625). – 2003. – www.analog.com.
4. ADXRS150: ±150°/s Single chip yaw rate gyro with signal conditioning data sheet // Data sheet. – 2004. – Rev. A. 1/03. – P. 8.

Комиссаров Алексей Владимирович – стажер-исследователь НИИ вычислительных средств и систем управления МИЭТ.

Степанов Николай Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники МИЭТ. *Область научных интересов:* микропроцессорные системы для мобильных объектов.

УДК 004.272.2:004.896+681.51

Децентрализованный метод коллективного распределения целей в группе роботов

С.Г.Капустян

НИИ многопроцессорных вычислительных систем
Таганрогского государственного университета

Предложен метод коллективного распределения целей в задаче группового управления роботами, ориентированный на реализацию в децентрализованных системах управления. Метод отличается достаточной простотой и может быть использован бортовыми устройствами управления автономных роботов, обладающими ограниченными вычислительными ресурсами и функционирующими в составе групп, решающих крупномасштабные целевые задачи в условиях динамических недетерминированных сред.

Как только первые роботы появились на предприятиях, практически сразу же возникла проблема их группового применения и управления [1]. Одиночный робот, каким бы он сложным не был и каким бы интеллектом не обладала его система управления, может использоваться только для решения некоторых частных задач либо выполнения довольно простых операций. Как правило, он обладает малыми возможностями для решения крупномасштабных задач.

Преимущества группового применения роботов очевидны. Это и большой радиус действия, достигаемый за счет рассредоточения роботов по рабочей зоне, и расширенный набор выполняемых функций, достигаемый за счет установки на каждый робот индивидуальных исполнительных устройств для выполнения различных работ, и, наконец, более высокая вероятность выполнения задания, достигаемая за счет перераспределения целевых задач между роботами группы в случае выхода из строя отдельных роботов группы. Поэтому такие сложные задачи как, например, масштабное исследование и зондирование поверхности других планет, сборка сложных конструкций в космосе или под водой, участие в боевых и обеспечивающих операциях, разминирование территорий и т.п. могут быть эффективно решены роботами только при их групповом применении. При этом возникает задача группового управления роботами, сложность которой значительно выше, чем задачи управления одиночным роботом.

Для оценки сложности задачи группового управления роботами необходимо ее формализовать. Пусть в среде E функционирует группа мобильных роботов \mathfrak{R} , состоящая из N роботов R_j ($j = 1, \dots, N$) (j – номер робота в группе). Состояние робота $R_j \in \mathfrak{R}$ в момент времени t описывается вектором $\mathbf{R}_j(t) = [r_1(t), r_2(t), \dots, r_n(t)]^T$, а состояние всей группы \mathfrak{R} – вектор-функцией $\mathfrak{R}(t) = f_R(\mathbf{R}_1(t), \mathbf{R}_2(t), \dots, \mathbf{R}_N(t))$.

© С.Г.Капустян, 2006

Элементами вектора $R_j(t)$ являются значения параметров состояния робота $R_j \in \mathfrak{R}$ в момент времени t . К таким параметрам могут быть отнесены: запас энергоресурса, скорости и ускорения (линейные, угловые), координаты положения, углы ориентации (курс, крен, дифферент) и т.п.

Состояние среды вокруг робота $R_j \in \mathfrak{R}$ в момент времени t описывается вектором $\mathbf{E}_j(t) = [e_1(t), e_2(t), \dots, e_n(t)]^T$, а состояние среды, в которой функционирует группа роботов, – вектор-функцией $\mathbf{E}(t) = f_E(\mathbf{E}_1(t), \mathbf{E}_2(t), \dots, \mathbf{E}_N(t))$.

Элементами вектора $\mathbf{E}_j(t)$ являются значения параметров среды, измеренные с помощью бортовых сенсорных устройств роботов при функционировании группы в заранее неизвестной среде или полученные заранее, если среда стационарна и организована. К таким параметрам могут относиться: координаты и размеры препятствий, в том числе и подвижных, характеристики поверхности, по которой перемещаются роботы, значения различных сил, действующих в среде.

Тогда задача группового управления роботами заключается в определении таких управлений \mathbf{u}_j для роботов $R_j \in \mathfrak{R}$ на интервале $[t_0, t_f]$, где t_0 – начальный момент времени или момент начала функционирования группы \mathfrak{R} и t_f – момент окончания функционирования группы \mathfrak{R} , которые бы обеспечивали экстремум функционала

$$Y = \int_{t_0}^{t_f} F(t, \mathfrak{R}(t), \mathbf{E}(t), \mathbf{u}_1(t), \mathbf{u}_2(t), \dots, \mathbf{u}_N(t)) dt, \quad (1)$$

задающего цель функционирования группы роботов \mathfrak{R} и оценивающего качество процесса управления группой. При этом на управления $\mathbf{u}_j(t)$ налагаются ограничения $\mathbf{u}_j(t) \in \{\mathbf{u}_e\}$ ($j = \overline{1, N}$), означающие, что вектор управления $\mathbf{u}_j(t) = [u_{j1}(t), u_{j2}(t), \dots, u_{jv}(t)]^T$ должен принадлежать множеству допустимых управлений, т.е. не приводящих к аварийным ситуациям. Элементами вектора $\mathbf{u}_j(t)$ являются управления $u_{ji}(t)$ ($i = \overline{1, v}$), формируемые системой управления для различных исполнительных устройств робота $R_j \in \mathfrak{R}$.

Функционал $Y \rightarrow \min$, если подынтегральная функция $F(\cdot)$ характеризует затраты и риски, и $Y \rightarrow \max$, если $F(\cdot)$ характеризует выгоды, получаемые в результате функционирования группы роботов.

Очевидно, что сложность сформулированной выше задачи группового управления роботами как минимум в N раз (N – число роботов в группе) выше, чем задача управления одиночным роботом.

Задача группового управления роботами значительно усложняется, если

$$\mathbf{u}_j(t) = f_u(\mathbf{u}_1(t), \dots, \mathbf{u}_{j-1}(t), \mathbf{u}_{j+1}(t), \dots, \mathbf{u}_N(t)), \quad (2)$$

т.е. вектор управления $\mathbf{u}_j(t)$ роботом $R_j \in \mathfrak{R}$ зависит от управлений другими роботами группы. Такая зависимость обычно возникает, если роботы группы решают единую целевую задачу.

Еще больше задача усложняется, если в среде действуют некие силы, являющиеся помехой для роботов группы и способные изменять их состояние непредсказуемым образом, т.е. среда динамическая и недетерминированная. Здесь возникает проблема

управляемости группой роботов. В классической теории оптимального управления понятие управляемости связано с существованием таких управлений, которые переводили бы систему из одного состояния в другое при различных условиях и ограничениях [2].

При решении задачи группового управления роботами в условиях динамической недетерминированной среды понятие управляемости необходимо дополнить возможностью отыскания управления, переводящего систему из одного состояния в другое за время $\tau_u \ll \Delta t$, где Δt – время, за которое она переходит из одного состояния в другое. При этом нет необходимости определять управления $\mathbf{u}_j(t)$ на весь интервал $[t_0, t_f]$, так как состояния роботов могут изменяться под воздействием внешних сил на столько, что эти управления могут оказаться недопустимыми.

Очевидно, что целесообразно определять эти управления на период Δt , а затем по истечении времени решать задачу снова. В этом случае задача группового управления роботами, решающими единую для группы целевую задачу, заключается в определении для каждого робота группы управления $\mathbf{u}_j(t)$, которое бы на интервале времени $[t_c, t_c + \Delta t]$ (где t_c – текущий момент времени) с учетом ограничений $\mathbf{u}_j(t) \in \{\mathbf{u}_e(t)\}$ и зависимости (2) приводило к экстремуму функционала

$$Y = \int_{t_c}^{t_c + \Delta t} F(t, \mathfrak{R}(t), \mathbf{E}(t), \mathbf{u}_1(t), \mathbf{u}_2(t), \dots, \mathbf{u}_N(t), \mathbf{g}_1(t), \mathbf{g}_2(t), \dots, \mathbf{g}_N(t)) dt. \quad (3)$$

Здесь $\mathbf{g}_j(t)$ ($j = \overline{1, N}$) – вектор внешних сил, действующих на робот $R_j \in \mathfrak{R}$ ($j = \overline{1, N}$) и являющихся помехой для роботов. Это может быть противодействие со стороны каких-либо объектов среды, в том числе и организованное противодействие со стороны другой группы роботов. Группу роботов, действия которых направлены на достижение общей цели, будем называть коллективом роботов.

Таким образом, необходимо определить эффективные методы управления коллективами роботов, функционирующими в динамических недетерминированных средах.

В общем случае можно выделить две основные группы методов группового управления роботами: централизованные и децентрализованные [3]. К преимуществам централизованного управления можно отнести простоту его организации и алгоритмизации. Однако такое управление предполагает значительную определенность условий решения сформулированной выше задачи группового управления, а также большое время решения задачи. Поэтому методы централизованного управления обычно используются, если возможно определить управления $\mathbf{u}_j(t)$ на всем интервале $[t_0, t_f]$ заранее, а затем роботы должны только отрабатывать эти управления, т.е. эти методы применимы для стационарных структурированных сред. Другим существенным недостатком централизованных методов является низкая «живучесть» систем управления, использующих эти методы, так как выход из строя центрального управляющего устройства или канала связи между этим устройством и роботами приводит к выходу из строя всей системы и невозможности решения целевой задачи.

Указанные недостатки в значительной мере устраняются при использовании децентрализованных методов группового управления роботами. Основными преимуществами децентрализованных методов по сравнению с централизованными являются: более низкая вычислительная сложность задачи управления, так как система управления

каждого робота $R_j \in \mathfrak{R}$ ($j = \overline{1, N}$) определяет только управления для данного робота – $\mathbf{u}_j(t) \in \{\mathbf{u}_e(t)\}$, обеспечивающие экстремум функционалов

$$Y_j(t) = \int_{t_c}^{t_c + \Delta t} F(t, \mathbf{R}_j(t), \mathbf{E}_j(t), \mathbf{u}_j(t), \mathbf{g}_j(t)) dt ; \quad (4)$$

высокая надежность, так как выход из строя бортовых устройств управления даже нескольких роботов не приводит к выходу из строя всей системы и вероятность решения целевой задачи остается достаточно высокой за счет возможности перераспределения функций и действий между роботами группы.

Недостатком децентрализованных методов является сложность алгоритмизации задачи группового управления, особенно, когда роботы для достижения поставленной цели должны взаимодействовать друг с другом определенным образом в зависимости от изменений ситуации.

Обычно при использовании децентрализованных методов группового управления общая целевая задача декомпозируется на отдельные, не связанные между собой или слабосвязанные подзадачи, которые ставятся перед роботами группы. Каждый робот решает задачу определения управлений $\mathbf{u}_j(t)$ самостоятельно без учета зависимости (2), т.е. без взаимодействия. В этом случае функционал, задающий цель функционирования группы \mathfrak{R} и характеризующий качество процесса управления, определяется как $Y(t) = f(Y_1(t), Y_2(t), \dots, Y_N(t))$, где $Y_j(t)$ ($j = \overline{1, N}$) – функционал (4). Однако, если даже все $Y_j(t)$ ($j = \overline{1, N}$) достигают экстремума, это совсем не означает, что экстремума достигает функционал $Y(t)$.

Проблема может быть решена при использовании метода коллективного управления, предложенного в [4, 5].

В основу метода коллективного управления группой роботов положены следующие основные принципы:

- каждый робот определяет свои действия (управления) самостоятельно с учетом своего состояния $\mathbf{R}_j(t)$, состояния окружающей среды $\mathbf{E}_j(t)$, действий других роботов $\mathbf{u}_1(t), \mathbf{u}_2(t), \dots, \mathbf{u}_{j-1}(t), \mathbf{u}_{j+1}(t), \dots, \mathbf{u}_N(t)$;

- действия каждого робота направлены на достижение коллективной цели.

Другими словами, каждый робот $R_j \in \mathfrak{R}$ определяет свой вектор управления $\mathbf{u}_j(t) \in \{\mathbf{u}_e(t)\}$ с учетом зависимости (2), чтобы обеспечивался экстремум функционала (4).

В отличие от управления коллективом, которое может быть как централизованным, так и децентрализованным, коллективное управление всегда децентрализованное.

Одной из задач коллективного управления является распределение целей в коллективе роботов. Однако эта задача формулируется как известная из классической теории оптимального управления задача назначения, для решения которой разработан ряд точных [6] и приближенных методов [7], использующих алгоритмы линейного и дискретного программирования.

Однако задача распределения целей в коллективе роботов имеет и ряд отличий от классической задачи назначения. Во-первых, количество роботов и количество целей может быть неодинаковым. Во-вторых, одну цель могут выбрать несколько роботов.

В-третьих, классическая задача назначения обычно решается для стационарных условий. В-четвертых, основное отличие заключается в том, что классические методы ориентированы на централизованное решение, со всеми его недостатками, которые являются существенными при функционировании роботов в динамической недетерминированной среде.

Предлагается метод коллективного распределения целей в коллективе роботов, построенный на приведенных выше принципах коллективного управления.

Пусть в некоторой среде функционирует коллектив роботов \mathfrak{R} , состоящий из N роботов. Целевая задача \mathbf{T} может быть декомпозирована на \mathbf{M} подзадач. Каждая из которых может решаться одним или несколькими роботами, т.е. $\mathbf{T} = [\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \dots, \mathbf{T}_M]$. Каждая такая подзадача \mathbf{T}_i ($i = \overline{1, M}$) может характеризоваться конечным состоянием роботов \mathfrak{R}_i и среды \mathbf{E}_i , т.е. $\mathbf{T}_i = f(\mathfrak{R}_i, \mathbf{E}_i)$.

Каждой целевой подзадаче \mathbf{T}_i ($i = \overline{1, M}$) (далее цели) для каждого робота $R_j \in \mathfrak{R}$ ($j = \overline{1, N}$) ставится в соответствие некоторая оценка эффективности d_{ji} , характеризующая выгоды, которые получит коллектив \mathfrak{R} при достижении роботом R_j цели \mathbf{T}_i . В частности, для мобильных роботов d_{ji} может определяться как произведение вероятности достижения роботом R_j цели \mathbf{T}_i и коэффициента приоритета цели k_i . Вероятность достижения цели \mathbf{T}_i может зависеть от числа выбравших ее роботов N_i . При некотором N_i вероятность становится равной единице, поэтому целесообразно ограничить число роботов, которые могут выбрать цель \mathbf{T}_i ($i = \overline{1, M}$) значением N_i^{\max} .

С учетом изложенного задача распределения целей в коллективе роботов может быть сформулирована следующим образом. Необходимо для каждого робота $R_j \in \mathfrak{R}$ ($j = \overline{1, N}$) найти такую цель \mathbf{T}_i ($i = \overline{1, M}$), что некоторая величина

$$Y = \sum_{j=1}^N d_{ji} \rightarrow \max \quad (5)$$

при указанных ограничениях на число роботов, выбравших одну цель – N_i^{\max} ($i = \overline{1, M}$).

Выражение (5) является аналогом функционала (4) для дискретных систем и критерием оптимальности распределения целей в коллективе роботов.

Для того чтобы решать задачу коллективного распределения целей, каждый робот $R_j \in \mathfrak{R}$ ($j = \overline{1, N}$) коллектива должен обладать информацией о целях в виде одномерного массива $\mathbf{D}_j[1, M] = [d_{j1}, d_{j2}, \dots, d_{jM}]$ оценок эффективности, ограничениях на выбор той или иной цели в виде одномерного массива $\mathbf{N}^{\max} = [N_1, N_2, \dots, N_M]$, а также информацией о решениях, принятых другими роботами, поступающей от них по каналам связи. Коллективное принятие решения, естественно, предполагает их «обсуждение» и оценку всеми роботами и соответственно предполагает обмен информацией между роботами.

Метод основывается на некоторой итерационной процедуре оптимизации коллективного решения, аналогичной процедуре, описанной в работах [4, 5]. В рамках этой процедуры каждый робот в каждом цикле делает попытку выбора цели. При этом предусматривается возможность отказа робота от выбранной цели, если выбор этой цели другим роботом даст больший эффект, т.е. большее приращение значения функционала (5).

Предложенный в работах [4, 5] метод зачастую дает приближенный результат, но во много раз проще, чем точные методы, описанные, например, в [6], и может быть реализован в реальном времени для оперативного перераспределения целей при изменении ситуации. Критерием выбора цели при решении задачи распределения, приведенном в работах [4, 5], являлся максимум значения d_{ji} , т.е. цель T_i закрепляется за тем роботом $R_j \in \mathcal{R}$, для которого оценка d_{ji} была наибольшей по сравнению с оценками других роботов, выбравших эту же цель (естественно, при условии $n_i > N_i^{\max}$). Если же оценки эффективности одной и той же цели были максимальными и одинаковыми для нескольких роботов, то она закреплялась за роботом либо с меньшим номером, либо с большим, либо случайно. Последствия такого выбора не учитывались. Точность метода можно повысить, если при выборе целей анализировать не только оценки эффективности d_{ji} , но и возможные изменения функционала (5) в том случае, если робот $R_j \in \mathcal{R}$ откажется от выбранной в текущем итерационном цикле цели и выберет другую цель. Тогда процедура распределения целей выглядит следующим образом.

В первом цикле все роботы $R_j \in \mathcal{R}$ ($j = \overline{1, N}$) анализируют каждый свой массив \mathbf{D}_j , находят в нем максимальное значение оценки d_{ji} . Значение индекса i этого максимального элемента массива указывает на номер цели-кандидата для выбора данным роботом. Если максимальные значения имеют несколько оценок, выбирается одна из них, например с меньшим значением i . Затем определяется оценка d_{jn} ($n \neq i$), имеющая

значение, ближайшее к максимальному, и значение $\Delta d_j = \max_{i=1}^M d_{ji} - \max_{n=1, n \neq i}^M d_{jn}$.

Далее каждый робот $R_j \in \mathcal{R}$ ($j = \overline{1, N}$) передает остальным роботам свой номер j , номер выбранной им цели i_j , а также значения d_{ji} и Δd_j . Значение Δd_j показывает, насколько в лучшем случае может «ухудшиться» функционал (5), если робот R_j выберет другую цель. Выбранная каким-либо роботом цель с номером i закрепляется за ним только в том случае, если d_{ji} для него максимально. Если несколько роботов имеют одинаковые максимальные значения d_{ji} , то цель закрепляется за роботом, у которого значение Δd_j больше, естественно, при условии, что число выбравших какую-либо цель роботов не превышает значение N_i^{\max} для этой цели, т.е. в одном итерационном цикле по меньшей мере один робот выбирает себе цель.

Так как все роботы имеют одну и ту же информацию, то и решения, принимаемые ими, будут одинаковыми. Робот, за которым цель закреплена, больше не участвует в процедуре распределения целей. После того как цель закреплена за роботом в массиве \mathbf{N}^{\max} каждого робота, значение N_i^{\max} (где i – номер выбранной цели) уменьшается на единицу. Если значение N_i^{\max} становится равным 0, то цель считается обеспеченной, т.е. ее выбрало максимально допустимое число роботов, и больше не участвует в распределении до окончания процедуры. Для этого всеми роботами $R_j \in \mathcal{R}$ ($j = \overline{1, N}$) значение d_{ji} для выбранной и обеспеченной цели обнуляется. После выбора какой-либо цели каким-либо роботом, если она при этом не обеспечена, значение оценки эффективности может быть модифицировано.

В следующем цикле итерационной процедуры действия повторяются до тех пор, пока все цели не будут обеспечены, т.е. массивы \mathbf{D}_j и \mathbf{N}^{\max} у всех роботов обнулится либо все роботы $R_j \in \mathcal{R}$ ($j = \overline{1, N}$) не выберут себе цели.

Через время Δt , когда ситуация изменится на столько, что эти изменения могут быть измерены с помощью бортовых сенсорных устройств роботов, процедура целе-распределения может быть повторена с учетом изменившейся ситуации. При этом для текущей ситуации опять рассчитываются значения элементов массивов \mathbf{D}_j и \mathbf{N}^{\max} с учетом достигнутых целей.

Предложенный усовершенствованный метод коллективного распределения целей может быть отнесен к классу приближенных методов. Однако, как показали прогоны данного метода на модельных примерах решения задачи распределения целей с использованием точных методов, описанных в работе [6], и предложенного метода в 90% случаев результаты совпали. Максимальное отклонение результатов, полученных с использованием предложенного метода коллективного распределения целей, от результатов точных методов составило не более 9%. При этом вычислительная сложность задачи, решаемой бортовыми устройствами управления роботов, реализующими предложенный метод, приблизительно в $2N$ (N – число роботов в коллективе) ниже, чем задача, возлагаемая на центральное устройство управления, реализующее централизованные точные методы решения задачи назначения [6]. Число итераций при этом не превышает N , в то время как у известных методов это число может достигать $2N$. Кроме того, децентрализованный метод коллективного распределения целей является достаточно устойчивым при выходе из строя даже нескольких роботов, а также при пропадании связи между отдельными роботами. Данные факторы приводят лишь к некоторому ухудшению показателя (5), но работоспособность системы сохраняется.

Простота метода, а также небольшой объем информации, которой должны обмениваться роботы, делают этот метод весьма эффективным в условиях сложных динамических сред, когда принимаемые решения должны быть не столько оптимальными в глобальном смысле, сколько целесообразными и быстрыми в текущей ситуации. Также данный метод требует незначительных вычислительных ресурсов, что делает его применимым для такой области робототехники, как микроробототехника. Микророботы, как правило, обладают крайне ограниченными возможностями, и только их групповое или даже массовое (до нескольких десятков тысяч) применение может привести к эффективному решению поставленной перед ними задачи, а предлагаемый метод может обеспечить режим реального времени при управлении большими группами микророботов.

Данный метод может быть использован не только для решения задачи распределения целей в коллективах роботов, но и в других случаях, когда нужно решать задачу, подобную задаче назначения, например распределение и перераспределение ресурсов в компьютерных сетях, в автоматизированных системах управления производством и т.п.

Литература

1. Робототехника / Ю.Д.Андреанов, Э.П.Бобриков, В.Н.Гончаренко и др. // Под ред. Е.П.Попова, Е.И.Юревича. – М.: Машиностроение, 1984. – 288 с.
2. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А.Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.

3. **Каляев И.А., Гайдук А.Р.** Стайные принципы управления в группе объектов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 2. – С. 29–33.
4. **Капустян С.Г., Усачев Л.Ж., Стоянов С.В.** Метод оптимального распределения целей в коллективе роботов // Информационные технологии. – 1998. – № 4. – С. 29–34.
5. **Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.** Распределенные системы планирования действий коллективов роботов. – М.: Изд-во «Янус-К», 2002. – 292 с.
6. Основы теории оптимального управления / **В.Ф.Кротов, Б.А.Лагоша и др.** // Под ред. **В.Ф.Кротова**. – М.: Высшая школа, 1990. – 430 с.
7. **Финкельштейн Ю.Ю.** Приближенные методы и прикладные задачи дискретного программирования. – М.: Наука, 1976. – 264 с.

Капустян Сергей Григорьевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией интеллектуальных систем обработки информации, принятия решений НИИ многопроцессорных вычислительных систем Таганрогского государственного радиотехнического университета. *Область научных интересов:* робототехника, искусственный интеллект, интеллектуальные системы управления роботами, распределенные интеллектуальные системы группового управления роботами, интеллектуальные системы обработки информации и распознавания объектов.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 548.3:621.382.049.77.008

Сопоставление рентгеновского и пикнометрического методов оценки качества слоев нитрида алюминия

А.С. Неустроев, С.А. Неустроев

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Нитрид алюминия применяется в качестве изоляционного конструкционного материала, который характеризуется теплостойкостью и инертностью к воздействию реагентов, высокой теплопроводностью и большим удельным электросопротивлением. Совокупность этих свойств нитрида алюминия обусловила его применение в электронике, в том числе в приборах с высоким энерговыделением, особенно СВЧ-диапазона: корпусов, подложек, волноводов [1].

Нитрид алюминия имеет несколько кристаллических модификаций. Особую ценность для электроники представляют кристаллы с гексагональной сингонией типа вюрцита, которые можно использовать как пьезоэлектрики для ускорения электронных потоков в составе структур с полупроводниками, а также как фильтры, ультразвуковые микроскопы и др. Вюрцитная фаза нитрида алюминия описана во многих работах, параметры ее кристаллической решетки определены с высокой точностью. Более надежные параметры приводит Национальное бюро Стандартов США [2]: $a \approx 3,1114 \cdot 10^{-10}$ м, $c \approx 4,9792 \cdot 10^{-10}$ м. Этим параметрам отвечает рентгеновская плотность (определяют рентгенографически) соединения, равная $3,26$ г/см³. Структурные данные различных авторов отличаются не более чем на 1% и, по-видимому, объясняются различной чистотой исследованных образцов.

В то же время экспериментальные данные по плотности могут существенно отличаться от приведенного значения. Так, в Химической энциклопедии приводится плотность, равная $3,12$ г/см³ [5]. Различие рентгеновской и измеренной плотности никак не может быть объяснено наличием примесей – образцы плотностью $3,12$ г/см³ содержат, несомненно, только вюрцитную фазу.

В таблице приведены кристаллографические постоянные и соответствующие им расчетные и измеренные значения плотности нитрида алюминия.

Кристаллографические постоянные, расчетные и измеренные значения плотности нитрида алюминия

Сингония	Параметры ячейки, 10^{-10} м	Плотность, г/см ³		Литературный источник
Гексагональная	$a = 3,1114; c = 4,9792$	3,25947	Расчет	[2]
То же	$a = 3,1127; c = 4,9816$	3,255654	То же	[3], с. 328
« «	$a = 3,11; c = 4,98$	3,262356	« «	[4], с. 515
« «	$a = 3,111; c = 4,9754$	3,263536	« «	[5], с. 212
« «	–	3,12	Измерение	[5], с. 212
« «	–	3,13	То же	[6], с. 100
Кубическая	$a = 4,0450$	4,112316	Расчет	[7], с. 7
То же	$a = 7,913$	4,394465	То же	[8], с. 99
« «	$a = 4,12$	3,891804	« «	Fiala

© А.С. Неустроев, С.А. Неустроев, 2006

Заметное увеличение плотности может быть следствием наличия кубической фазы нитрида алюминия. Известно несколько кубических фаз, которые существенно различаются размерами элементарных ячеек (например, от 0,066186 [7] до 0,49548 нм³ [Fiala. Central Research Institute SKODA, Czechoslovakia, 1973; Private Communication]) и соответственно плотностями.

Расчетные значения плотности гексагональной и кубической сингонии носят характер предельных. Экспериментальные значения плотности фиксируют пикнометрическую плотность. Хотя она отражает присутствие в образцах пустот и дефектов, в то же время образцы [5] могут быть эталоном, содержащим гексагональную фазу. Меньшие значения плотности нитрида алюминия для изделий, изготовленных в контролируемых условиях, могут указывать только на наличие дефектов. Наличие даже в небольших количествах centrosymmetric (кубической) фазы проявляется в блокировании и искажении направления движения акустических волн и, как следствие, ухудшении качества электронных приборов.

Таким образом, сопоставление экспериментальных значений плотности, в частности пикнометрической с рентгеновской, может быть инструментом, выявляющим наличие в образце кубической фазы.

Литература

1. *Werdecker W., Aldinger F.* Aluminium Nitride – an alternative ceramic substrate for high power application in microcircuits // IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology. – 1984. – Vol. CHMT-7, № 4. – P. 399–404.
2. Natl. Bur. Stand (US). Monogr. – 1975. – Vol. 25, № 12. – P. 5.
3. *Slack G.A.* Nonmetallic crystal with high thermal conductivity // J Phys. Chem. Solids. – 1973. – Vol. 34. – P. 321–335.
4. *Schulz H., Thieman H.S.* Crystal structure refinement of AlN and GaN // Solid State Communications. – 1977. – Vol. 23. – P. 815–819.
5. Химическая энциклопедия: В 5 т. / *Под ред. И.М. Кнунянца.* – 1988. – Т. 1. – 623 с.
6. Физические величины: Справочник / *Под ред. И.С. Григорьева и Е.З. Мейлихова.* – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
7. High pressure synthesis of rocksalt type of AlN / *H. Vollstadt, E. Ito, M. Akaishi et al.* // Proc. Japan Acad. – 1990. – Ser B. – Vol. 66. – P. 7–9.
8. *Kieffer R., Wruss W., Willer B.* Propriétés physiques et mécaniques de céramiques AlN-Al₂O₃ obtenues par compression à chaud // Rev Int. Hautes Temp. et Refract. – 1976. – Vol. 13. – P. 97–107.

Неустроев Алексей Степанович – сотрудник кафедры материаловедения и физической химии МИЭТ. *Область научных интересов:* технология монокристаллов.

Неустроев Степан Архипович – доктор технических наук, профессор кафедры материалов и процессов твердотельной электроники МИЭТ. *Область научных интересов:* электротехнология.

Теплоемкость антимонидов алюминия, галлия, индия

А.С. Малкова, А.С. Пашинкин, Ш.М. Надыров

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Монокристаллы и эпитаксиальные структуры AlSb, GaSb, InSb являются перспективными материалами электронной техники: AlSb используется для производства выпрямителей, транзисторов и фотоэлементов, GaSb является основным материалом для туннельных диодов, InSb применяется в приемниках инфракрасной радиации.

Низкотемпературная теплоемкость AlSb, GaSb, InSb измерена У. Пицбергенем [1] в интервале 12–273 К. Им же рассчитана стандартная энтропия этих соединений. Р. Кокс и М. Пул [2] измерили теплоемкость антимонидов Al, Ga, In в интервале 300–1200 К методом калориметрии сброса. Эти данные от температуры не зависят, что свидетельствует об их недостоверности, и в дальнейшем не рассматривались. Б. Лихтер и П. Соммеле также методом калориметрии сброса [3] измерили теплоемкость AlSb, GaSb, InSb в интервале от 298,15 К до температуры плавления. Высокотемпературную теплоемкость антимонидов Al, Ga, In измерили К. Итагаки и К. Ямагучи [4] в интервале 650–1550 К. Для расчета зависимости $C_p = f(t)$ для AlSb использовались данные работ [1, 3, 4], для GaSb – данные работ [1, 3]. Данные работы [4] сильно занижены и во внимание не принимались. Для расчета температурной зависимости теплоемкости InSb использовались только данные, полученные в [1, 3].

Полученные значения зависимости теплоемкости от температуры для AlSb, GaSb, InSb приведены в табл. 1.

Таблица 1

Температурная зависимость теплоемкости антимонидов Al, Ga, In, Дж/(моль·К)

Соединение	$C_p = a + bT + cT^{-2}$			Интервал температур, К	Источник
	a	$b \cdot 10^3$	$c \cdot 10^5$		
AlSb	53,56	–	–	798–1150	[2]
	45,44	8,56	0,022	298,15–1330	[3]
	43,4	10,85	–0,17	800–1327	[4]
	46,94	7,36	–2,39	298,15–1327	Наши рекомендации
GaSb	52,72	–	–	298,15–985	[2]
	45,18	11,83	–0,026	298,15–985	[3]
	48,4	9,98	–1,80	800–1500	[4]
	46,04	11,0	–0,74	298,15–798	Наши рекомендации
InSb	51,88	–	–	298,15–798	[2]
	47,42	10,86	0,032	298,15–797	[3]
	58,3	1,81	–8,86	650–800	[4]
	49,47	8,52	–1,91	298,15–800	Наши рекомендации

Таблица 2

Термодинамические функции антиминоидов Al, Ga, In

T, K	$C_p, Дж/(моль·К)$	$H_T - H_{298}, Дж/(моль·К)$	$S_T, Дж/(моль·К)$	$\Phi_T^{XX}, Дж/(моль·К)$
Антиминоид Al				
298	46,4	–	64,3	64,3
400	48,4	5254	79,4	66,3
500	49,7	10400	90,9	70,1
600	50,7	15580	100,3	74,4
700	51,6	20810	108,4	78,7
800	52,4	26100	115,5	82,8
900	53,3	31450	121,4	84,4
1000	54,1	36870	127,5	90,6
1100	54,8	42360	132,7	94,2
1200	55,6	47920	137,5	97,6
1300	56,4	53540	142,1	100,9
1330	56,6	55250	143,3	101,8
Антиминоид Ga				
298	48,5	–	76,1	76,1
400	50,0	5151	90,9	78,0
500	51,2	10290	102,4	81,8
600	52,4	15520	111,9	86,0
700	53,6	20860	120,1	90,3
800	54,7	26300	127,4	94,5
900	55,8	31850	133,9	98,5
985	56,8	36650	139,0	101,8
Антиминоид In				
298	49,9	–	87,1	87,1
400	51,7	5513	103,0	89,2
500	53,0	10940	115,1	93,2
600	54,1	16420	125,1	97,7
700	55,0	21960	133,7	102,3
797	56,0	27410	140,9	106,6

На основании данных по теплоемкости и значений стандартной энтропии [6] рассчитаны термодинамические функции антиминоидов Al, Ga, In, приведенные в табл.2.

Литература

1. *Piesbergen U.Z.* Natur. forschung. – 1963. – Bd 18a, № 2. – S. 141.
2. *Cox R.H., Pool M.J.* Journal of chemical and engineering data. – 1967. – Vol. 12, № 2. – P. 247.
3. *Lichter B.D., Sommelet P.* Transaction Metallurgical Soc. AIME. – 1969. – Vol. 245, january. – P. 99.
4. *Itagaki K., Yamaguchi K.* Termochimi Acta. – 1990. – Vol. 163. – P. 1.
5. *Barin I., Kubaschewski O., Hesselman K.* Thermochemical properties of inorganic substances. – 2-d ed. VI. – Berlin, Hidelberg, N.Y.: Springer – Verlag Stahleisen. – 1992. – P. 1113.
6. Термические константы веществ: Справ. / Под ред. Глушко В.П. – М.: ВИНТИ, 1971. – Вып. 5.

Малкова Антонина Семеновна – кандидат химических наук, доцент кафедры материаловедения и физической химии МИЭТ. *Область научных интересов:* физико-химические исследования в области материаловедения и микроэлектроники.

Пашинкин Андрей Сергеевич – доктор химических наук, профессор кафедры материаловедения и физической химии МИЭТ. *Область научных интересов:* физико-химические исследования в области материаловедения и микроэлектроники.

Надыров Шамиль Маратович – студент МИЭТ.

Методика разработки многофункциональной операционной системы для смарт-карты

Д.В. Шорин

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Смарт-карта [1] представляет собой программируемый микроконтроллер с процессором и областью памяти. Под многофункциональной операционной системой подразумевается гибкое ядро с возможностью добавлять функциональные модули, реализующие ту или иную функциональность, регламентированную стандартами. Гибкость ядра заключается в высокой масштабируемости остова операционной системы. Способ выполнения подобной задачи заключается в разработке удобного интерфейса между ядром и модулем для обмена информацией.

Функции ядра состоят в предоставлении средств работы с аппаратным обеспечением микроконтроллера, что включает в себя управление вводом/выводом, организацию памяти, доступ к ней, а также поддержку интерфейса для работы с модулями. Наибольшую гибкость ядру операционной системы обеспечивает использование диспетчера, динамически подключающего модули на этапе компоновки состава операционной системы. Чтобы упростить и свести к минимуму затраты на разработку модулей, целесообразно поместить в ядро интерпретатор языка высокого уровня с выполненными модулями. Тогда в процессе работы с модулями ядро вызвало бы этот интерпретатор и использовало его для выполнения программного кода модуля. Такой подход делает независимой от аппаратной платформы разработку модулей, предоставляя возможность использовать для написания и отладки программного кода даже персональный компьютер, где бы применялся такой же интерпретатор. Возможность выбора интерпретатора достаточно широка: начиная от собственно изобретенного до использования виртуальной машины языка Java [2] или платформы .NET.

Данная методика предполагает реализацию требуемой от смарт-карты функциональности с помощью модуля, а не внутри ядра операционной системы. Ядро лишь обеспечивает работу модулей. Такое разграничение обязанностей позволяет наделить операционную систему гибкостью и многофункциональностью, превращая алгоритм для микроконтроллера в полноценный программный комплекс.

Литература

1. *Rankl W., Effing W.* Smart Card Handbook. – Hoboken USA: John Wiley & Sons, 2004. – 1120 p.
2. *Attali I., Jensen T.* Java on Smart Cards. Programming and Security. – New York USA: Springer. – 2001. – 163 p.

Шорин Дмитрий Владимирович – аспирант кафедры информатики и программного обеспечения вычислительных систем МИЭТ. *Область научных интересов:* исследование и разработка программных комплексов для микропроцессоров смарт-карт.

ЮБИЛЕИ

Коледову Леониду Александровичу – 70 лет

Исполняется 70 лет известному ученому в области конструирования и технологии производства электронных средств, заслуженному деятелю науки РФ, доктору технических наук, профессору, заведующему кафедрой микроэлектроники МИЭТ (с 1973 по 2003 гг.) Коледову Леониду Александровичу.

Коледов Л.А. родился 10 марта 1936 г. в деревне Еремейцево Ростовского района Ярославской области в семье колхозников. В 1954 г. окончил Петровскую среднюю школу и поступил на физико-химический факультет Московского института стали. Закончив аспирантуру по кафедре экспериментальной физики и физики твердого тела, в 1963 г. защитил кандидатскую диссертацию.

Педагогическую деятельность начал в 1961 г. в качестве преподавателя автомеханического техникума при объединении ЗИЛ, продолжил в Электростальском филиале МИСиС, а затем с 1968 г. – в Московском институте электронной техники.

В 1966 г. Коледов Л.А. избран деканом факультета горячей обработки металлов Электростальского филиала МИСиС. В сентябре 1968 г. он зачислен в МИЭТ доцентом кафедры материаловедения и физико-химических основ технологии микроэлектроники. С 1969 г. – декан объединенных факультетов электронного машиностроения и физико-химического, с 1970 г. – декан физико-химического факультета МИЭТ. В феврале 1973 г. он избран на должность заведующего кафедрой микроэлектроники и начинает организацию и подготовку выпуска инженеров по новой для МИЭТ и дефицитной в стране специальности



«Конструирование и производство РЭА и ЭВА».

С 1974 по 1986 гг. Коледов Л.А. член президиума научно-методического совета Минвуза по технологии, конструированию и производству радио- и электронно-вычислительной аппаратуры, с 1986 г. член учебно-методической комиссии по специальностям автоматики, электроники, микроэлектроники и радиотехники в УМО при ЛЭТИ.

Начало активной творческой научной работы связано с изучением физико-химических и электрофизических свойств металлических расплавов. Монография Коледова Л.А. «Металлические расплавы и их свойства» имеет высокий уровень цитируемости в научной литературе. В теории кинетических свойств простых жидкостей, развитой Коледовым Л.А., предложена флуктуационная модель кооперативного

перемещения диффундирующих атомов, установлена корреляция связи вязкостных и термодинамических свойств металлических расплавов и предложены аналитические формулы для расчета вязкости регулярных и разбавленных растворов металлов. Теоретические и экспериментальные исследования влияния примесей на электрическое сопротивление металлов, проведенные Коледовым Л.А., привели к уточнению известного правила Линде. Он занимался вопросами осаждения из газовой фазы тугоплавких жаростойких покрытий на поверхность деталей.

В докторской диссертации Коледова Л.А. развита теория и определены условия равномерного осаждения тонких пленок из газовой фазы на поверхность кремниевых пластин в производстве интегральных микросхем, сделан крупный шаг в решении важной научно-технической проблемы микроэлектроники – создании технологии бездефектного кристалла. Им создана научная школа исследователей, плодотворно работающая в указанных направлениях. Под его руководством подготовлено 19 кандидатов наук, некоторые в дальнейшем защитили докторские диссертации, стали руководителями кафедр в технических вузах, возглавили научно-исследовательские подразделения НИИ.

Коледов Л.А. автор свыше 250 научных трудов и 33 свидетельств на изобретения. Он является соавтором ряда монографий, посвященных технологии производства интегральных микросхем и микроэлектронной аппаратуры. Монография «Микроэлектронная аппаратура на безкорпусных интегральных микросхе-

мах», отмеченная премией Госкомобразования, является лучшей на сегодняшний день оригинальной отечественной публикацией в области теории и практики разработок и создания микроэлектронных изделий, которая закрепляет приоритет российской науки и техники в этой области.

Учебник Л.А. Коледова «Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок» (1989), учебное пособие «Конструирование и технологии микросхем» (1984) и серия учебных пособий «Микроэлектроника» из 9 книг в настоящее время наиболее широко используются в вузах страны при подготовке инженерных кадров в области микроэлектроники, вычислительной техники, радиоэлектроники, автоматики и связи. Под редакцией профессора Коледова Л.А. осуществлены перевод и издание актуальной для развития отечественной электроники монографии «Технология поверхностного монтажа. Будущее технологии сборки в микроэлектронике» (1990).

Профессор Коледов Л.А. имеет правительственные награды, является признанным в РФ и за рубежом активным работающим ученым. В сферу его научной деятельности входят наиболее существенные и актуальные на сегодняшний день и на перспективу научно-технические проблемы технологии изделий микроэлектроники. В настоящее время профессор Коледов Л.А. продолжает активную работу по подготовке и выпуску специалистов по конструированию и технологии производства изделий микроэлектроники.

Желаем Леониду Александровичу крепкого здоровья, благополучия, дальнейших успехов в педагогической и научной деятельности.

Редколлегия журнала

CONTENTS

Microelectronics technology

- A.P.Baraban, Yu.V.Petrov, S.G.Sazonov* Electroluminescence of Si-SiO₂ Structures Containing Excess Silicon..... 3
- N.A.Zaitsev, I.V.Matyushkin* Investigation of Initial Step Kinetics of High Temperature Silicon Oxidation in Dry Oxygen..... 9

Microelectronics and semiconductor devices

- N.N.Bezryadin, V.V.Asessorov, S.V.Sizov, E.A.Mikhayluk, Y.V.Synorov, T.A.Kuzmenko, V.N.Pakhomov* Influence of Metal on Silicon Surface Electron States in Me-Ga₂Se₃-(SiO_x)Si Heterostructure 18
- A.A.Shirokov, V.A.Sergeev, O.A.Dulov* Exploration of Current Distribution in Bipolar Transistor Using Electro-Fluctuation Method..... 26
- Yu.I.Alekseev, I.V.Maliev, S.A.Nashchanskii* Investigation of Laser Radiation Influence on Gunn Oscillator Frequency..... 34
- Yu.E.Grigorashvili, R.G.Karpov, A.M.Stepanov* Method of Weak Magnetic Field Sources Location 37

Information technologies

- L.G.Gagarina, V.V.Slyusar* Estimation Methodology for Operation Efficiency of Automated Retrieval System Based on Integral Criteria of Search Quality Level 42
- A.A.Vlasov, N.M.Skulkin, A.V.Zuev* Use of Expert System for Recognition of Metal-Ceramic Bodies and Commutation Cards Defects 47

Circuit engineering and design

- A.G.Sokolov, E.A.Chepurnykh* Complex of Programs for Automated Design of Digital Equipment Interfaces..... 52
- S.A.Artemov* Converter for Translation of Circuits from Basic FPGA into Basic BMC 57

Integral radioelectronic devices

- V.V.Chistyukhin, K.S. Lyalin, V.I.Sizov, V.Yu.Kochetkov* Spatial Interference Reduction Using Digital Antenna Array..... 64
- D.V.Zinovev* All Digital PLL 71

Mycosystems

- A.V.Komissarov, N.V.Stepanov* Range Extension Methods for Measuring Angular Rates of Micromechanical Gyros ADXRS150, ADXRS300..... 77

Microprocessor systems

- S.G.Kapustyan* Decentralized Method of Collective Distribution of Purposes in Robot Group..... 84

Brief reports

- A.S.Neoustroev, S.A.Neoustroev* Comparison of Roentgen and Pictometric Methods of AlN Layer Quality Estimation..... 92
- A.S.Malkova, A.S.Pashinkin, Sh.M.Nadyrov* Heat Capacity of Antimonides Al, Ga, In 94
- D.V.Shorin* Methods of Designing Multifunctional Operating System for Smart Card 96

Anniversaries

- L.A.Koledov is 70 years old 97

ABSTRACTS

MICROELECTRONICS TECHNOLOGY

Electroluminescence of Si-SiO₂ Structures Containing Excess Silicon

A.P.Baraban, Yu.V.Petrov, S.G.Sazonov

Electroluminescence spectra of Si-implanted Si-SiO₂ structures have been investigated. After implantation the samples were annealed in N₂ at 1100 °C. Two new electroluminescence bands at 2,7 eV and 4,3 eV were observed. These peaks can be attributed to the formation of the oxygen deficiency centers, such as two-fold coordinated silicon. The new peak at 1,6 eV has been observed after annealing. This peak is probably due to silicon nanocluster formation.

Investigation of Initial Step Kinetics of High Temperature Silicon Oxidation in Dry Oxygen

N.A.Zaitsev, I.V.Matyushkin

The initial step of the high temperature (~1000 °C) oxidation kinetics in the dry oxygen atmosphere (0,1–1 ATM.) has been considered. The polymeric model of the oxidation has been extended by the thermodynamic analysis of the three-component system «silicon – vacancies – oxygen». Within the designed mathematical model the entropy and free Gibbs energy of the given system are connected with the kinetic parameters.

MICROELECTRONICS AND SEMICONDUCTOR DEVICES

Influence of Metal on Silicon Surface Electron States in Me-Ga₂Se₃-(SiO_x)Si Heterostructure

*N.N.Bezryadin, V.V.Asessorov, S.V.Sizov, E.A.Mikhayluk,
Y.V.Synorov, T.A.Kuzmenko, V.N.Pakhomov*

Field heterostructures Me-Ga₂-Se₃-(SiO_x) Si with Al, N, Mg and Pt metal contacts have been investigated by the high-frequency capacitance – voltage (C – V) method. It has been determined that an increase of the metal work function results in the growth of probability of the tunnel exchange charge carriers between the space charge region in Si and the localized electron states in the Ga₂Se₃ layer. This effect becomes apparent in the appearance of the slightly sloping part on C – V curves of heterostructure Pt-Ga₂-Se₃-(SiO_x)Si characteristic of the surface electron states in Si.

Exploration of Current Distribution in Bipolar Transistor Using Electro-Fluctuation Method

A.A.Shirokov, V.A.Sergeev, O.A.Dulov

Based on the two-component noise model of a bipolar transistor the possibility of an assessment of the current distribution irregularity in the transistor structure according to the results of the low-frequency noise measurement has been shown. Based on the experimental noise characteristics of the serially produced transistors the dependencies of the coefficient of the emitter current distribution between the central and peripheral areas of the emitter on full current have been calculated. The regularities and specific features of the above mentioned dependencies have been discussed and explained within the frame of the current distribution known models.

Investigation of Laser Radiation Influence on Gunn Oscillator Frequency

Yu.I.Alekseev, I.V.Maliev, S.A.Nashchanskii

The experimental data determining the presence of the VHF Gunn oscillator change under the influence of semiconductor laser on Gunn diode has been presented.

Method of Weak Magnetic Field Sources Location

Yu.E.Grigorashvili, R.G.Karpov, A.M.Stepanov

The problems arising during location of the weak magnetic field dipole sources have been considered. The efficiency of various magnetic antenna options as well as of the calculation methods of the source three coordinates and of the dipole moment components has been investigated.

INFORMATION TECHNOLOGIES

Estimation Methodology for Operation Efficiency of Automated Retrieval System Based on Integral Criteria of Search Quality Level

L.G.Gagarina, V.V.Slyusar

The problem of estimation and comparison of the operation efficiency of the information automatic search subsystems in automated office work and document circulation has been considered. The question of deduction of a common mathematical integral criterion of the efficiency, based on the part of the relevant documents delivered by the system in answer to the inquiry, is raised.

Use of Expert System for Recognition of Metal-Ceramic Bodies and Commutation Cards Defects

A.A.Vlasov, N.M.Skulkin, A.V.Zuev

The computer training system «Expert» has been considered. The principles of creating the knowledge of the metal-ceramic bodies and the commutation cards defects have been demonstrated. The algorithms of the text construction mathematical model as well as of the training program work have been presented.

CIRCUIT ENGINEERING AND DESIGN

Complex of Programs for Automated Design of Digital Equipment Interfaces

A.G.Sokolov, E.A.Chepurnykh

The automated design method for interfaces between the device to be developed and a computer has been described. The possibilities of a system approach to designing the interaction of the device with a computer have been demonstrated. The system of the commands to be extended, enabling to change the protocol of exchange with the device without changing the program intended for the command input, has been developed.

Converter for Translation of Circuits from Basic FPGA into Basic BMC

S.A.Artemov

The main functions executed by the converter have been considered. The route for translation of files from basic FPGA into basic BMC has been described.

INTEGRAL RADIOELECTRONIC DEVICES

Spatial Interference Reduction Using Digital Antenna Array

V.V.Chistyukhin, K.S. Lyalin, V.I.Sizov, V.Yu.Kochetkov

The most important aspects of the Smart Antenna Array design and functioning for spatial interference reduction have been considered. The main problems, which have to be solved during the process of the digital antenna array creation, have been formulated.

All Digital PLL

D.V.Zinovev

The issues in development of the PLL system intended for formation of synchronizing signals in the 32-bit RISC processors have been considered. The specific feature of the system is its design on the digital logic elements. The transfer function of the completely digital PLL system, which can be used for determination of the PLL system stability conditions in development of the functional blocks, has been presented.

MYCROSYSTEMS

Range Extension Methods for Measuring Angular Rates of Micromechanical Gyros ADXRS150, ADXRS300

A.V.Komissarov, N.V.Stepanov

A brief description of the main characteristics and operation principles of the micromechanical angular rate sensors (gyros) ADXRS150 and ADXRS300 of Analog Devices' company production has been given, also, three range extension methods for measuring the angular rates for these devices have been considered. The advantages and the drawbacks of the given methods have been presented. The obtained results can be used in works on creation of the miniature inertial navigation systems, which can be applied on movable or portable objects.

MICROPROCESSOR SYSTEMS

Decentralized Method of Collective Distribution of Purposes in Robot Group

S.G.Kapustyan

The method of collective distribution of the purposes in the problem of group control by robots, focused on realization in the decentralized control systems, has been offered. The method is distinguished by sufficient simplicity and can be used by the onboard control devices of independent robots, possessing the limited computing resources and functioning in the structure of groups, which achieve the large-scale target tasks in conditions of the dynamic non-determined environments.

BRIEF REPORTS

Comparison of Roentgen and Pictometric Methods of AlN Layer Quality Estimation

A.S.Neoustroev, S.A.Neoustroev

The calculated values of density (Roentgen) w-AlN and c-AlN have been presented. Their comparison with the pictometric density exposes the c-AlN concentration in AlN.

Heat Capacity of Antimonides Al, Ga, In

A.S.Malkova, A.S.Pashinkin, Sh.M.Nadyrov

The literature data on the heat capacity of AlSb, GaSb and InSb have been analyzed from 12 K to the melting point temperature. The temperature dependence of the heat capacity for these compounds in the interval from 298 K to the melting point temperature has been presented as equations $C_p = a + bT + cT^2$. The thermodynamic characteristics of AlSb, GaSb, InSb have been calculated.

Methods of Designing Multifunctional Operating System for Smart Card

D.V.Shorin

The methods for designing the smart card operating system software have been presented. This system provides the information security function, such as the personal keys, and performs the authentication procedure giving to a card owner an access to the secret data storage.