

Известия высших учебных
заведений

ЭЛЕКТРОНИКА

6'2008

Научно-технический журнал

Издается с 1996 г.

Выходит 6 раз в год

СОДЕРЖАНИЕ

Материалы электронной техники

Хабибуллин И.Х., Шмидт Е.В., Матухин В.Л. Исследование электронных и магнитных свойств полупроводникового соединения CuFeS_2 в диапазоне температур 77–300 К..... 3

Поголов А.И., Грушевский А.М., Долговых Ю.Г., Сурин Ю.В., Виговская Т.В., Бычкова В.С. Исследование напряженно-деформированного состояния материалов герметизированной сборочной конструкции СВЧ МДП-диодов..... 8

Руднев А.В., Хлынов А.В. Использование сканирующей зондовой микроскопии в исследованиях электроосаждения меди на платине в присутствии органической добавки 15

Технология микрэлектроники

Беспалов В.А., Овчинников В.А., Базанов Д.В., Аваков С.М. Методы устранения дефектов топологии интегральных микросхем на фотошаблонах 20

Гаврилов С.В., Гудкова О.Н., Каграманян Э.Р. Анализ надежности функционирования цифровых КМОП СБИС с учетом эффектов деградации транзисторов 30

Информационные технологии

Колдаев В.Д. Эвристические и квазитопологические алгоритмы контурной сегментации изображений..... 41

Парфененко А.С., Рыбачек А.В., Рыбалко Е.С. Особенности функционирования и применений ассоциативной памяти 46



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

Адрес редакции: 124498,
Москва, Зеленоград,
проезд 4806, д. 5, МИЭТ
Тел. 8-499-734-6205
Факс 8-499-710-5429
E-mail: magazine@rnd.miet.ru
<http://www.miet.ru>

Интегральные радиоэлектронные устройства

Чиркунова Ж.В., Лялин К.С., Орешкин В.И. Исследование алгоритма множественного доступа с пространственным разделением каналов в системе с цифровой антенной решеткой..... 52

Алексеев В.Е., Савченко Ю.В., Соловьев А.Н. Проблемы построения фильтра Калмана в многоантенной системе на основе спутниковых сигналов GPS/GLONASS 58

Методы и техника измерений

Филатов А.Л., Герус А.В., Кораблев Е.М., Луговской А.В. Локальное измерение электрооптических параметров кремниевых структур на основе фоторефрактивного эффекта 66

Проблемы высшего образования

Григорьев В.К., Грушин А.В. Методика автоматизированной обработки зачетно-экзаменационных ведомостей в полнофункциональной ИУС «Деканат» 71

Краткие сообщения

Ефимов А.Г., Панин В.Ф. Полосно-пропускающие фильтры на диэлектрических резонаторах с высокой проницаемостью..... 79

Бец В.П., Ковтонюк А.В., Кантор А.В., Невзоров А.В., Шишаков А.Е. Телеметрическая система сбора и регистрации данных макета спускаемого аппарата космического аппарата «Фобос-Грунт» для обеспечения полигонных испытаний..... 81

Беневоленский С.Б., Истомина Н.Л., Смирнова А.А., Спыну М.В. Программный комплекс для систем дифрактометрического контроля и измерения геометрических параметров элементов топологии ИМС..... 83

Бобринецкий И.И., Лосев В.В. Емкостная методика сканирующей зондовой микроскопии в атмосфере воздуха 85

Конференции

Вторая Всероссийская межвузовская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы информатизации. Развитие информационной инфраструктуры, технологий и систем»..... 88

Contents 89

Abstracts 90

Тематический указатель статей, опубликованных в 2008 году 93

К сведению авторов 99

Заведующая редакцией
С.Г.Зверева

Редактор
А.В.Тихонова

Научный редактор
С.Г.Зверева

Художественный редактор
А.В.Тихонова

Корректор
Л.Ф.Летунова

Технический редактор
Л.Г.Лосякова

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

Подписано в печать 28.11.08
Формат бумаги 60х84 1/8.
Печать офсетная.
Объем 11,63 усл.печ.л.,
10,4 уч.-изд.л.
Заказ № 151.

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

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

Включен в Перечень периодических научных изданий, рекомендуемых для публикации научных работ, отражающих основное научное содержание докторских диссертаций:

Бюллетень ВАК Министерства образования РФ, 2002, № 1.

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

УДК 621.315.592+537.31

Исследование электронных и магнитных свойств полупроводникового соединения CuFeS_2 в диапазоне температур 77–300 К

И.Х.Хабибуллин, Е.В.Шмидт, В.Л.Матухин

Казанский государственный энергетический университет

Исследована удельная проводимость поликристаллических образцов халькопирита CuFeS_2 в диапазоне температур 77–300 К. Обнаружено различие в поведении электрической проводимости в низкотемпературной области исследуемых образцов. Проведено детальное изучение спектра ядерного магнитного резонанса Cu в локальном поле в CuFeS_2 .

В настоящее время большой интерес проявляется к поиску новых перспективных материалов, позволяющих, с одной стороны, улучшить параметры электронных устройств, а с другой – создавать элементы нового типа. Особое внимание уделяется многокомпонентным полупроводниковым соединениям, которые обладают большим разнообразием электрофизических и оптических свойств по сравнению с элементарными и бинарными полупроводниками. Среди них особое место занимают тройные халькогенидные соединения со структурой халькопирита, применяющиеся в солнечной фотоэнергетике и спинтронике [1]. Однако халькопирит остается недостаточно изученным.

Халькопирит CuFeS_2 кристаллизуется в тетрагональной структуре с пространственной группой симметрии $I\bar{4}2d$ и параметрами кристаллической решетки $a = 5,292 \text{ \AA}$, $c = 10,407 \text{ \AA}$ [2]. Каждый атом металла окружен тетраэдром из ионов серы, которые имеют тетраэдрическое окружение из металлических ионов. Предполагается, что в халькопирите проявляются, по крайней мере, два ионных состояния: $\text{Cu}^+\text{Fe}^{3+}(\text{S}^{2-})_2$ и $\text{Cu}^{2+}\text{Fe}^{2+}(\text{S}^{2-})_2$ [2]. Халькопирит является магнитным полупроводником, так как в своем составе содержит магнитный ион Fe. Установлено, что халькопирит находится в антиферромагнитном состоянии с направлением вектора намагничивания вдоль кристаллографической оси c и температурой Нееля $T_N = 823 \text{ К}$ [3]. В то же время связь между ионными состояниями и магнитными и электрическими свойствами CuFeS_2 изучена недостаточно. Согласно полученным результатам [3] халькопирит является вырожденным полупроводником. Кроме того, существуют предположения о том, что халькопирит является бесщелевым полупроводником [4].

Цель настоящей работы – проведение сравнительных исследований температурных зависимостей удельной электропроводности $\sigma(T)$ и коэффициента Холла R_H в природных (№1, №2) и синтезированных (№3, №4) образцах халькопирита. Кроме того, в исследованных образцах проведены измерения спектров ядерного магнитного резонанса (ЯМР) $^{63,65}\text{Cu}$ в локальном поле.

Образцы и методика эксперимента. Методика приготовления синтезированных образцов изложена в работе [5]. Там же представлены рентгенограммы синтезированных образцов №3, №4 и результаты мессбауэровских исследований образцов природного происхождения и приготовленных искусственным путем. Естественные образцы различались геологическим происхождением. Образец №1 был взят из Талнахского месторождения, образец №2 – из месторождения, находящегося в Болгарии.

Измерения удельной проводимости σ и коэффициента Холла R_H образцов халькопирита проводились на постоянном токе модифицированным четырехзондовым методом (методом Ван-дер-Пау) в интервале температур 77–300 К. Для постоянства тока через образец использовалась схема пассивной стабилизации тока. Образцы имели форму квадратных пластин размером 7,0×7,0×1,1 мм, на которые наносились омические контакты с помощью серебряной пасты фирмы «Sipi». Образец находился в криостате, помещенном между полюсами электромагнита с индукцией $B = 1$ Тл. Холловский сигнал наблюдался на фоне достаточно больших паразитных сигналов. Для их исключения и получения достоверных значений измерения проводились с коммутацией направления как магнитного поля, так и тока через образец. Таким образом, величина коэффициента Холла определялась путем усреднения. Температура снималась с помощью цифрового термометра с термопарой, позволяющей проводить измерения в диапазоне 70–500 К. Точность измерения температуры составила 0,1%, удельной проводимости 2,5%.

Экспериментальные данные по электропроводности σ и по коэффициенту Холла R_H использовались для расчета по хорошо известным формулам концентрации носителей заряда n и холловской подвижности μ :

$$n = -\frac{1}{eR_H}; \quad \mu = -R_H\sigma. \quad (1)$$

При комнатной температуре в образцах №1 и №2 концентрация носителей заряда $n \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$, в образцах №3 и №4 – $n \sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$; в образцах №1 и №2 холловская подвижность $\mu \sim 10^{-2} \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, в образцах №3 и №4 – $\mu \sim 10^{-1} \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Изучение спектра ЯМР проводилось на импульсном ЯКР спектрометре ИС-3 на ядрах меди $^{63,65}\text{Cu}$ при температуре 77 К с непрерывной протяжкой по частоте. Для проведения исследований были использованы поликристаллические образцы с характерным размером кристаллитов ≤ 50 мкм.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Результаты измерений температурной зависимости удельной проводимости $\sigma(T)$ приведены на рис.1. Было обнаружено, что для образца природного происхождения №1 при $T = 77$ К значение электропроводности σ оказалось на три порядка меньше, чем в других образцах. При повышении температуры во всех образцах наблюдался рост электропроводности. Причем в образце природного происхождения №2 рост наблюдается до температуры примерно 210 К, затем происходит снижение значения $\sigma(T)$. В синтезированных образцах №3, №4 рост удельной проводимости продолжается примерно до 280 К, затем происходит небольшое уменьшение. Для образца №1 не наблюдалось снижение удельной проводимости в температурном диапазоне 77–300 К. Удельная проводимость синтезированных образцов выше, чем у образцов природного происхождения. Для сравнения приведены результаты (образец №5), полученные в работе [4]. По знаку коэффициента Холла был определен тип проводимости, для всех исследованных образцов проводимость оказалась n -типа. Температурная зависимость коэффициента Холла $R(T)$ представлена на рис.2.

Сигналы ЯМР $^{63,65}\text{Cu}$ в локальном поле были нами обнаружены только лишь в образце №1. Общий вид полученного спектра показан на рис.3.

В природных образцах халькопирита №1 и №2 большие различия в проводимости при 77 К трудно объяснить наличием примесей. Как отмечалось в работе [6], примеси в CuFeS_2 не так сильно влияют на удельное сопротивление и тип носителей заряда. Полученные результаты в низкотемпературной области можно объяснить, приняв гипотезу о ферронном характере переноса носителей в антиферромагнетиках, когда электрон проводимости создает вокруг себя ферромагнитную область радиусом R , ориентируя спины соседних магнитных атомов параллельно своему [7]. Небольшое же различие в проводимости в синтезированных образцах №3 и №4 во всем температурном диапазоне может быть связано с отклонением от стехиометрии [5].

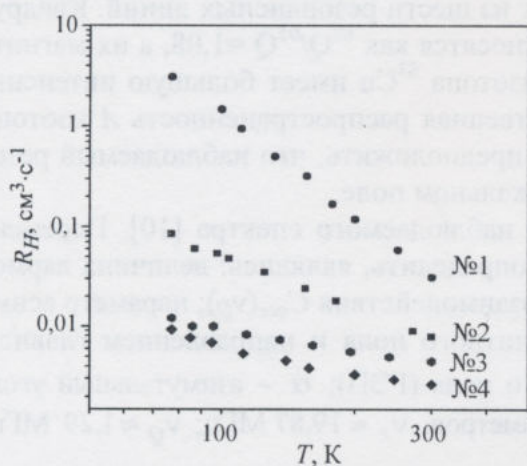


Рис.2. Температурная зависимость коэффициента Холла

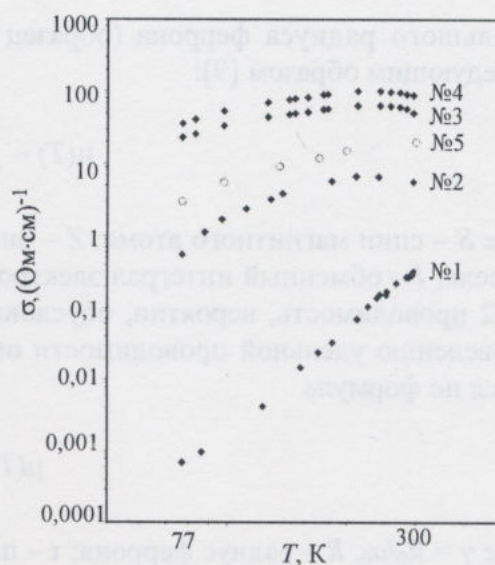


Рис.1. Температурная зависимость удельной проводимости в полупроводнике CuFeS_2

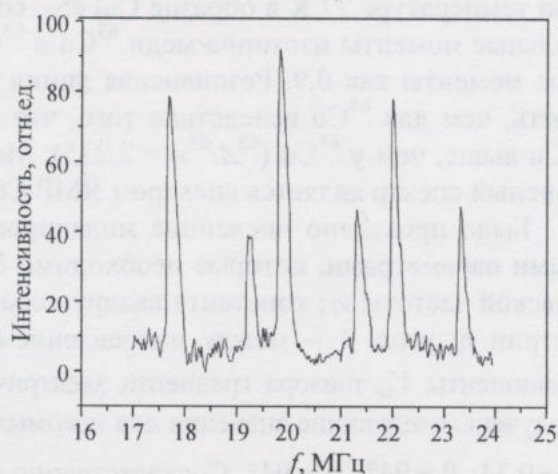


Рис.3. Спектр ЯМР $^{63,65}\text{Cu}$ в CuFeS_2 ($T = 77 \text{ К}$)

Проведенный анализ хода температурных зависимостей $\sigma(T)$, $R_H(T)$ во всех исследованных образцах показал их степенной характер $\sim T^m$. Для образца №1 степень m индекса оказалась приблизительно равной 3 для зависимости $\sigma(T)$ и $m = -3$ для зависимости $R_H(T)$, для образца №2 степень $m \sim 3/2$ для $\sigma(T)$ и $-3/2$ для $R_H(T)$, в синтезированных образцах №3, №4 степень $m \sim 1,2$ для $\sigma(T)$ и $-1,2$ для $R_H(T)$. Известно, что степенная зависимость $R_H(T) \sim T^m$ характерна для бесщелевых полупроводников [8]. Бесщелевое состояние является следствием зонного вырождения, вызванного симметрией кристаллической решетки. Отличие степенных индексов m в образцах №1 и №2, по-видимому, вызвано различными механизмами подвижности, определяющими поведение $\mu(T)$, которые могут быть связаны с различными радиусами ферронов в данном соединении при низких температурах. Ранее было обнаружено [4], что подвижность носителей заряда в CuFeS_2 очень мала ($\mu \sim 1 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$) и почти отсутствует ее температурная зависимость. Такое поведение характерно для относительно

большого радиуса феррона (образец №1). В этом случае подвижность определяется следующим образом [9]:

$$\mu(T) \sim \sqrt{\frac{24}{ZS(S+1)}} \frac{ea_0^2 k\theta}{\hbar IS}, \quad (2)$$

где S – спин магнитного атома; Z – число соседних магнитных атомов; θ – температура Нееля; I – обменный интеграл электрона проводимости на магнитном атоме. В образце №2 проводимость, вероятно, обусловлена ферронами малого радиуса, что приводит к поведению удельной проводимости $\sigma(T) \sim T^{3/2}$. Подвижность в этом случае определяется по формуле

$$\mu(T) \sim \frac{ea_0^2}{kT\tau\gamma^4} \sim \frac{1}{T}, \quad (3)$$

где $\gamma = R_0/a_0$, R – радиус феррона; τ – постоянная спиновой релаксации.

Таким образом, различия в температурных зависимостях $\sigma(T)$ в исследованных образцах могут быть связаны с ферронным характером переноса носителей заряда.

Спектр ЯМР на ядрах меди во внутреннем локальном магнитном поле, полученный при температуре 77 К в образце CuFeS_2 , состоит из шести резонансных линий. Квадрупольные моменты изотопов меди ^{63}Cu и ^{65}Cu относятся как $^{63}\text{Q}/^{65}\text{Q} = 1,08$, а их магнитные моменты как 0,9. Резонансная линия для изотопа ^{63}Cu имеет большую интенсивность, чем для ^{65}Cu вследствие того, что естественная распространенность A изотопа ^{63}Cu выше, чем у ^{65}Cu ($^{63}A/^{65}A = 2,235$). Можно предположить, что наблюдаемый резонансный спектр является спектром ЯМР Cu в локальном поле.

Было проведено численное моделирование наблюдаемого спектра [10]. Переменными параметрами, которые необходимо было определить, являлись: величина лармовской частоты ν_L ; константа квадрупольного взаимодействия $C_{qcc}(\nu_Q)$; параметр асимметрии η ; угол β – между направлением магнитного поля и направлением главной компоненты V_{zz} тензора градиента электрического поля (ГЭП); α – азимутальный угол. Получены следующие значения для искомых параметров: $\nu_L \approx 19,87$ МГц; $\nu_Q \approx 1,29$ МГц; $\eta \approx 0,34$; $\beta \approx 94^\circ$; $\alpha \approx 94^\circ$. Соответственно значения локального магнитного поля на ядрах меди $H = \nu_L/\gamma = 17,6$ кГс и $C_{qcc} = 2\nu_Q \approx 2,58$ МГц (для ядерного спина меди $I = 3/2$). При этом угол между направлением магнитного поля и направлением главной оси V_{zz} тензора ГЭП весьма близок к 90° . Относительно небольшие значения константы квадрупольного взаимодействия, полученные при обработке спектра, вероятнее всего, связаны с высокой симметрией ближайшего окружения ядер меди.

Отсутствие сигналов ЯМР $^{63,65}\text{Cu}$ в локальном поле в образцах №2, №3, №4, возможно, связано с неоднородностью локальных магнитных полей, вызванной относительно большой подвижностью ферронов, в отличие от образца №1, где подвижность мала и локальное поле сравнительно однородное.

Исследование температурной зависимости удельной проводимости $\sigma(T)$ в полупроводнике CuFeS_2 показало, что при низких температурах имеются большие различия в величине удельной проводимости и температурной зависимости $\sigma(T)$ в CuFeS_2 природного и искусственного происхождения. Такое поведение может быть объяснено, если принять вывод о ферронном характере переноса зарядовых носителей в антиферромагнитной фазе CuFeS_2 , когда носители зарядов сосредоточены в ферронных областях.

Подтверждением этого может служить обнаружение сигнала ЯМР $^{63,65}\text{Cu}$ в локальном поле в образце №1, где наблюдается низкое значение σ , обусловленное малой подвижностью носителей.

Литература

1. *Иванов В.А., Аминов Т.Г., Новоторцев В.М., Калинин В.Т.* Спинтроника и спинтронные материалы // Изв. Академии Наук. Сер. хим. – 2004. – № 11. – С. 2255–2304.
2. *Pauling L., Brockway L.O.* The crystal structure of chalcopyrite CuFeS_2 // Z. Krist. – 1932. – N 82. – P. 188–194.
3. *Teranishi B.T.* Magnetic and electric properties of chalcopyrite // J. Phys. Soc. Jpn. – 1961. – Vol.16, Issue 10. – P. 1881–1887.
4. Электронные характеристики CuFeS_2 при низких температурах и его зонная схема в точке Г / *Л.В.Крадинова, А.М.Полуботко, В.В.Попов и др.* // ФТТ. – 1987. – Т. 29, № 7. – С. 2209–2212.
5. Мессбауэровские исследования природного и синтетического халькопирита. Актуальные проблемы физики твердого тела / *В.Л.Матухин, Г.И.Петров, И.Х.Хабибуллин и др.* // Сб. докладов междунар. науч. конф. ФТТ-2007. – Минск. – 2007. – Т. 2. – С. 49–51.
6. *Pridmore D.F., Shuey R.T.* The electrical resistivity of galena, pyrite and chalcopyrite // Am. Mineral. 1976. – Vol. 61. – P. 248–253.
7. *Нагаев Э.Л.* Физика магнитных полупроводников. – М.: Наука, 1978. – 131 с.
8. *Цидильковский И.М.* Бесщелевые полупроводники – новый класс веществ. – М.: Наука, 1986. – 240 с.
9. *Kasuya T., Yanase A., Takeda T.* Mobility of a large paramagnetic polaron // Solid State Commun. – 1970. – Vol. 8, Issue 19. – P. 1551–1554.
10. *Погорельцев А.И., Хабибуллин И.Х., Матухин В.Л.* Особенности распределения электронной плотности в CuFeS_2 из резонансных спектров $^{63,65}\text{Cu}$. Структура и динамика молекулярных систем // Сб. докл. XIV Всероссийской конф. Яльчик-2007. – Казань, 2007. – Вып. № 1. – Ч. А. – Раздел 2. – С. 531–534.

Статья поступила
после доработки
2 июля 2008 г.

Хабибуллин Илдар Хайдарович – ассистент кафедры физики Казанского государственного энергетического университета. *Область научных интересов:* физика магнитных полупроводников.

Шмидт Екатерина Вадимовна – аспирант кафедры физики Казанского государственного энергетического университета. *Область научных интересов:* физика полупроводниковых материалов.

Матухин Вадим Леонидович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Казанского государственного энергетического университета. *Область научных интересов:* физика полупроводниковых материалов.

Исследование напряженно-деформированного состояния материалов герметизированной сборочной конструкции СВЧ МДП-диодов

А.И.Поголов, А.М.Грушевский, Ю.Г.Долговых

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Ю.В.Сурин, Т.В.Виговская, В.С.Бычкова

ФГУП «НИИМП-К» (г. Москва)

Проведены исследования напряженно-деформированного состояния материалов конструкции СВЧ МДП-диодов, выполненной в виде соединения кремниевой мембраны с двумя золотыми балочными выводами, при температурном воздействии и воздействии повышенного атмосферного давления. Конструкция защищена различными герметизирующими материалами на основе лаков, эмалей, компаундов. Разработаны рекомендации по минимизации напряженно-деформированного состояния соединения разнородных материалов путем физической совместимости материалов герметизированной сборочной конструкции диода.

Для решения задач повышения параметров СВЧ-трактов и снижения массогабаритных показателей в настоящее время в аппаратуре связи широко используют мембранные СВЧ МДП-диоды. В работе предлагается новая конструкция диода на основе кремниевой мембраны толщиной 7 мкм с комбинированным слоем диэлектрика толщиной 0,16 мкм и двумя балочными выводами толщиной 7 мкм. Жесткость слоев диэлектрика на несколько порядков меньше жесткости кремниевой мембраны и балочных выводов, поэтому использовалась упрощенная расчетная схема диода без учета слоев диэлектрика (рис.1). Ширина кремниевой мембраны и выводов 0,36 мм. Электрические параметры сформированных СВЧ МДП-диодных структур подвержены изменениям, связанным с воздействием внешней среды, поэтому существует необходимость защиты поверхности таких структур пленками различных герметизирующих материалов. Герметики защищают поверхность от воздействия таких внешних факторов, как механические воздействия, в частности попадание механических частиц на поверх-

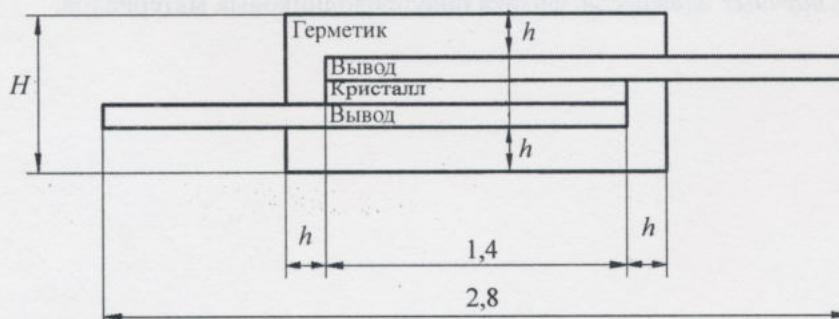


Рис. 1. Расчетная схема диода

ность прибора и механические повреждения, а также от влияния климатических факторов – давления, влажности и температуры окружающей среды. Толщина герметика h со всех сторон микросборки одинакова и равна 50–150 мкм, толщина диода H составляет 321 мкм.

В конструкции СВЧ МДП-диодов используются разнородные материалы, имеющие разные коэффициенты температурного линейного расширения (КТЛР) и модули упругости. При тепловых и силовых внешних воздействиях в конструкциях из разнородных материалов возникают механические деформации и напряжения. В тех случаях, когда механические напряжения достигают пределов прочности на растяжение или сжатие, материалы разрушаются. У большинства материалов сопротивление сжатия выше сопротивления растяжения, поэтому разрушение чаще всего происходит в области действия напряжений растяжения и начинается с образования трещины. При тепловых воздействиях трещина возникает в менее нагретых областях. Тепловые воздействия наиболее опасны для материалов, имеющих высокий ТКЛР, низкую теплопроводность, высокий модуль упругости, низкую прочность и пластичность. Элементы конструкций с резкими изменениями геометрии и формы являются концентраторами напряжений, которые затрудняют пластическую деформацию и являются зоной трещинообразования. Концентрация напряжений приводит к снижению прочности материалов, особенно при термоциклировании. Плавный переход от одной поверхности к другой уменьшает концентрацию напряжений.

Для герметизации применялись лак АД-9103 на полиимидной основе, эмаль ЭП-9114 на эпоксидной основе и кремнийорганический компаунд СИЭЛ. Эти материалы широко применяются в микроэлектронике и по своим физико-механическим свойствам охватывают наибольший диапазон изменения таких параметров, как модуль упругости E , коэффициент Пуассона μ , допускаемые напряжения $[\sigma]$, температурный коэффициент линейного расширения α . Физико-механические свойства материалов СВЧ МДП-диодов представлены в табл.1 [1, 2].

Таблица 1

Физико-механические свойства материалов конструкции

Материал	E , МПа	μ	$\alpha \cdot 10^6$, $^{\circ}\text{C}^{-1}$	$[\sigma]$, МПа
Кремний	$1,3 \cdot 10^5$	0,3	4,2	200
Золото	$0,82 \cdot 10^5$	0,42	14,2	300
Лак АД-9103	3000	0,34	30	44
Эмаль ЭП-9114	6000	0,32	60	30
Компаунд СИЭЛ 159-191	3	0,4	180	8

Рассмотрим основные технологические и эксплуатационные свойства этих герметизирующих материалов. Компаунды СИЭЛ представляют собой композиции на основе низкомолекулярных кремнийорганических олигомеров с различными добавками. Компаунды СИЭЛ производят в виде одно- или двухкомпонентных составов, которые вулканизуются как в открытых, так и в закрытых объемах, при любой толщине слоя, без выделения побочных продуктов. Диапазон температур вулканизации компаундов широк – от комнатной и даже минусовых температур до 250 $^{\circ}\text{C}$. Компаунды обладают хорошей адгезией к различным материалам электронной техники: металлам, золоту,

меди, алюминию, стеклу, керамике, пластмассам. Электроизоляционная эмаль марки ЭП-9114 с малым содержанием растворителя представляет собой двухкомпонентную систему, состоящую из полуфабрикатного лака (раствор эпоксидной смолы ЭД-20) и отвердителя аддукта ИМЭП-1. Предназначена для защиты печатных узлов, эксплуатируемых в интервале температур от -60 до $+125$ °С в любом климатическом районе, в том числе и в условиях тропического климата. Модуль упругости лака высокий, адгезия хорошая. Полиимидный лак – это раствор полиамидокислоты в полярном растворителе. Лаки и эмали на полиимидной основе являются теплостойкими среднечастотными диэлектриками. Лак, в частности марки АД-9103, наносят обычными методами или электростатическим напылением на любые материалы, выдерживающие нагрев до температуры не ниже 300 °С (температура сушки покрытия 300 – 400 °С). Полиимидные покрытия могут выдерживать температуру 260 – 290 °С в течение нескольких недель, сохраняя при этом свои защитные свойства. По твердости и износостойкости они значительно превосходят другие покрытия на основе органических составляющих и приближаются по указанному свойству к фарфору. Электроизоляция на основе полиимидного лака имеет высокую теплопроводность, химическую и эрозионную стойкость.

Задачи исследования напряженно-деформированного состояния соединения разнородных материалов из-за своей сложности требуют применения численных методов, основанных на дискретной обработке расчетной области с использованием метода конечных элементов (МКЭ) [3–5]. К преимуществам МКЭ относится возможность работы с объектами произвольной геометрии и формы из разнородных материалов. Суть метода заключается в разработке аналитической модели исследуемого объекта путем исключения несущественных деталей, редукции размерностей, разбиения объекта на конечные элементы (КЭ), подготовки данных для анализа и поиска наилучшего решения. Точность решения зависит от правильного выбора геометрии, построения сетки конечных элементов (количество КЭ, их форма и размеры), задания граничных условий и внешних воздействий, достоверности свойств материалов. Использовались КЭ в виде правильных многоугольников (куб, тетраэдр) с соотношением сторон не более $1:4$ и углами 30 – 150 °. Для оценки погрешности в зависимости от размеров КЭ выполнялось несколько расчетов при различных разбиениях объекта и строилась зависимость исследуемых параметров от размера КЭ, проводилась экстраполяция на случай размера КЭ, стремящегося к нулю. Минимальный линейный размер конечного элемента составлял 2 мкм, исследуемые модели содержали до $4 \cdot 10^5$ узлов.

Алгоритм метода расчета включает в себя модуль исходных физико-механических свойств используемых материалов. К основным свойствам материалов относятся: прочность – способность противостоять нагрузкам без разрушения; жесткость – способность противостоять изменению формы и размеров без разрушения; упругость – способность восстанавливать первоначальные размеры и форму после снятия нагрузок; пластичность – способность получать остаточную пластическую деформацию после снятия нагрузки; выносливость – способность противостоять действию переменных циклических напряжений без возникновения и развития трещины. Выбор материалов конструкции СВЧ МДП-диодов должен быть обоснован прежде всего по механической прочности, модулю упругости и КТЛР.

Анализ обеспечения прочности проводился в два этапа. На первом этапе определялись максимальные эквивалентные напряжения в материалах сборки по теории энергии изменения формы [6]. Затем максимальные эквивалентные напряжения сравнивали с допустимыми для данного материала и получали ответ на вопрос: является ли конструкция прочной. При моделировании использовались следующие принципы и допущения:

- деформации в материалах линейно-упругие, граничные условия не изменяются в процессе нагружения;
- материал сплошной, однородный, изотропный;
- зависимость между деформациями и напряжениями линейная;
- усилия, напряжения, деформации, вызванные различными внешними факторами, действуют независимо и соблюдается принцип суперпозиции;
- напряжения, вызванные различными факторами (внутренние начальные напряжения, температурные, от внешних силовых факторов и др.), суммируются с учетом знака.

Целью данного исследования является изучение закономерностей влияния конструктивно-технологических и эксплуатационных факторов на прочностную надежность материалов изделия. Исследовалось влияние марки герметика (использовался лак АД-9103, эмаль ЭП-9114, компаунд СИЭЛ); толщины герметика (50, 100, 150 мкм); теплового нагрева материалов изделия на 40 °С; воздействия повышенного атмосферного давления воздуха до $2 \cdot 10^5$ Па. Было разработано пять конечно-элементных моделей. Результаты представлены в табл.2 и 3. Конечно-элементная модель диода показана на рис.2. Для повышения точности и эффективности моделирования использовались свойства симметрии геометрии и граничных условий конструкций – рассматривалась половина полной модели.

Таблица 2

Эквивалентные напряжения (в МПа)
в материалах базовой модели

Материал	Сечение по толщине сборки		
	на оси симметрии	около угла кристалла	на выходе вывода из герметика
Кремний	77,3	85,5	-
Золото	39,8	66,4	18,6
Лак АД-9103	3,2	5,6	10,8

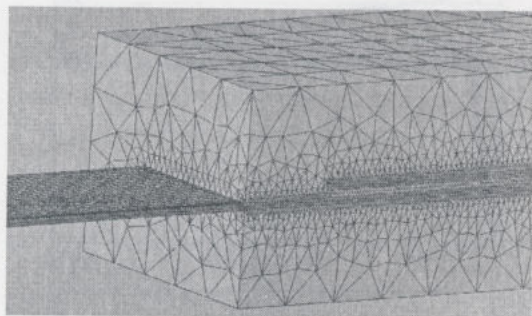


Рис. 2. Конечно-элементная модель диода

Таблица 3

Эквивалентные напряжения (в МПа) в материалах конструкции

Номер модели	Параметры	Материал		
		кремний	золото	герметик
№ 1 (базовая)	Герметик АД-9103, $h = 0,1$ мм	85,5	66,4	10,8
№ 2	Герметик АД-9103, $h = 0,15$ мм	73,6	88	6,8
№ 3	Герметик АД-9103, $h = 0,05$ мм	55	59	6,5
№ 4	Герметик ЭП-9114, $h = 0,1$ мм	175	209	34
№ 5	Герметик СИЭЛ 159-191, $h = 0,1$ мм	51	34	2,4

Основной эффект воздействия повышенного давления заключается в сжатии, деформации материалов, изменении внешнего вида изделия. Типичный вид отказов при этом – механическое повреждение. Приведем значения максимальных эквивалентных напряжений в материалах сборки диода при повышенном атмосферном давлении:

Материал сборки

σ_{\max} , МПа

Лак АД, $h = 0,1$ мм (модель № 1)
Лак АД, $h = 0,15$ мм (модель № 2)
Лак АД, $h = 0,05$ мм (модель № 3)
Эмаль ЭП, $h = 0,1$ мм (модель № 4)
СИЭЛ, $h = 0,1$ мм (модель № 5)

1,2
1,56
0,79
0,91
2,22

Наибольшие напряжения возникают в кремнии и золоте около угла кристалла. При увеличении толщины лака АД-9103 до 0,15 мм (модель № 2) максимальные напряжения увеличились в 1,3 раза и составили 1,56 МПа. При уменьшении толщины лака до 0,05 мм максимальные напряжения уменьшились в 1,52 раза и составили 0,79 МПа. Видно, что более жесткий герметик – эмаль ЭП-9114 эффективно разгружает материалы соединения золото – кремний при действии повышенного атмосферного давления.

На рис.3 представлено напряженно-деформированное состояние диода при тепловом нагреве на 40 °С при использовании трех марок герметика: лака АД-9103

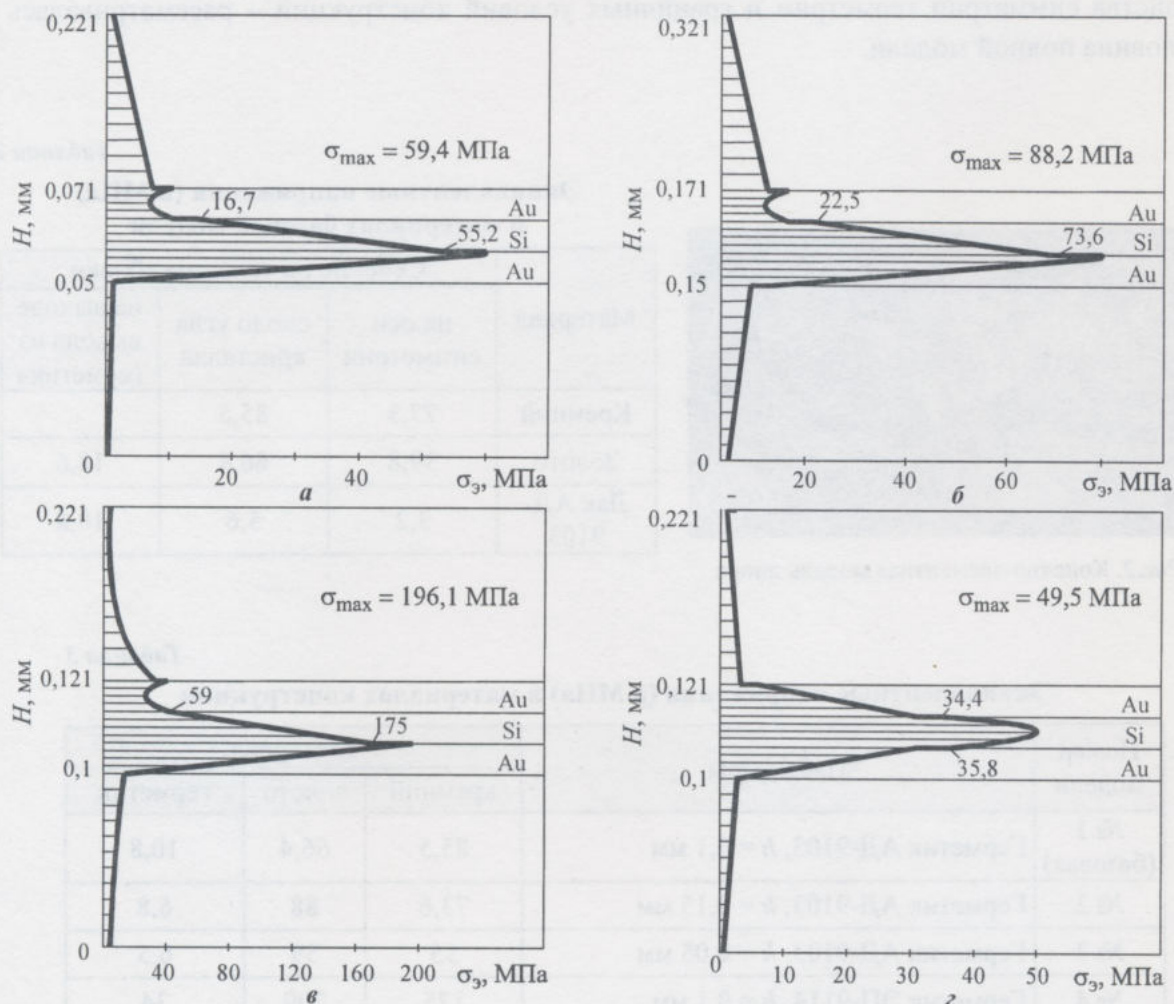


Рис.3. Эпюры распределения эквивалентных температурных напряжений по высоте сборки диода около угла кристалла при использовании следующих герметиков: а – лак АД-9103, $h = 0,05$ мм; б – лак АД-9103, $h = 0,15$ мм; в – эмаль ЭП-9114, $h = 0,1$ мм; з – компаунд СИЭЛ 159-191, $h = 0,1$ мм. Цифры на эпюрах – действующие значения напряжений (в МПа) в кремнии на границах раздела материалов

(рис.3,а,б, модель № 1); эмали ЭП-9114 (рис.3,в, модель № 4); компаунда СИЭЛ (рис.3,г, модель № 5). Использование для герметизации диода жесткой эмали ЭП-9114 ($E = 6000$ МПа, $\alpha = 60 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) обусловило высокие значения напряжения в материалах соединения золото–кремний $\sigma_{\max} = 209$ МПа. Использование лака АД-9103, имеющего более низкий модуль упругости ($E = 3000$ МПа) и КТЛР ($\alpha = 30 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), обусловило снижение максимальных напряжений в 2,44 раза – до 85,5 МПа. Применение податливого компаунда СИЭЛ с низким модулем упругости $E = 3$ МПа даже при плохой совместимости с золотом и кремнием по КТЛР ($\alpha = 180 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) привело к снижению максимальных напряжений до 51 МПа (см. табл.3).

В табл.2 приведены значения максимальных эквивалентных напряжений в материалах базовой модели. Видно, что в кристалле кремния наблюдается существенное повышение напряжений в кремнии с 77,3 на оси симметрии до 85,5 МПа около угла (коэффициент концентрации напряжений $k = 1,11$), в золотом выводе с 39,8 до 66,4 МПа ($k = 1,67$). В герметике (лак АД-9103) максимальные напряжения 10,8 МПа наблюдаются в месте выхода вывода из герметика ($k = 3,4$).

На эпюрах эквивалентных напряжений по высоте сборки около угла кристалла (см. рис.3,а,б) видно влияние толщины герметика на величину напряжений. Повышение толщины герметика с 0,05 до 0,15 мм приводит к повышению напряжений в золотом выводе в 1,5 раза.

Распределение максимальных эквивалентных температурных напряжений в золотом выводе по его длине для базовой модели № 1 показано на рис.4. Максимальные напряжения 66 МПа возникают около угла кристалла кремния на выходе вывода из герметика. Через 0,1 мм напряжения уменьшаются в 3,5 раза и составляют 18,6 МПа.

Проведенные исследования подтвердили существенное влияние конструктивно-технологических и эксплуатационных факторов на прочностную надежность материалов СВЧ МДП-диодов. При тепловых внешних воздействиях материалы конструкции диода должны быть совместимы по механической прочности, модулю упругости и температурным коэффициентам линейного расширения. При использовании эмали ЭП-9114 в кремнии и золотом выводе возникают напряжения, близкие к предельно допустимым – 175 и 209 МПа соответственно. Использование лака АД-9103 снижает напряжения в 2–3 раза, использование герметика СИЭЛ – в 3–6 раз. При увеличении толщины герметика с 0,05 до 0,15 мм напряжения в золотом выводе повышаются с 59,4 до 88,2 МПа (в 1,48 раза). При действии повышенного атмосферного давления для защиты целесообразно использовать жесткие герметики – эмаль ЭП-9114 или лак АД-9103, которые позволяют уменьшить напряжения в материалах соединения золото–кремний в 2–3 раза. Разработка и производство СВЧ МДП-диодов с улучшенными характеристиками позволят создать современную электронную компонентную базу, востребованную на рынке продуктов гражданского и военного назначения.

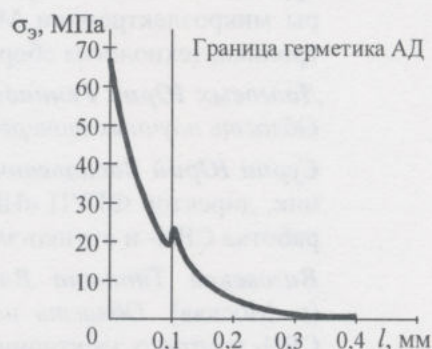


Рис.4. Распределение максимальных эквивалентных температурных напряжений по длине вывода при использовании герметика АД-9103

Литература

1. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С.Григорьева, Е.З.Мейлахова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
2. Кузнецов О.А., Поголов А.И., Сергеев В.С. Прочность элементов микроэлектронной аппаратуры. – М.: Радио и связь, 1990. – 144 с.
3. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM /CAE). – СПб.: Питер, 2004. – 560 с.
4. Норенков И.П., Кузьмич П.К. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 320 с.
5. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 448 с.
6. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 592 с.

Статья поступила
после доработки
5 мая 2008 г.

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

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

Долговых Юрий Геннадьевич – аспирант кафедры технической механики МИЭТ. *Область научных интересов:* проектирование и технология электронных средств.

Сурин Юрий Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, директор ФГУП «НИИМП-К» (г. Москва). *Область научных интересов:* разработка СВЧ- и оптико-электронных технологий, приборов, модулей и устройств.

Виговская Татьяна Владимировна – главный технолог ФГУП «НИИМП-К» (г. Москва). *Область научных интересов:* разработка технологий изготовления СВЧ- и оптико-электронных приборов и интегральных схем.

Бычкова Валентина Сергеевна – аспирант ГУП НПО «СПУРТ» (г. Москва). *Область научных интересов:* разработка технологий СВЧ-приборов на основе полупроводниковых и диэлектрических мембран.

Важная информация

В редакции журнала «Известия вузов. Электроника»
изменились номера телефона и факса.

Тел.: 8-499-734-62-05

Факс: 8-499-710-54-29

Использование сканирующей зондовой микроскопии в исследованиях электроосаждения меди на платине в присутствии органической добавки

А.В.Руднев

Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН (г. Москва)

А.В.Хлынов

ЗАО НТ-МДТ (г. Москва)

Изучено влияние адсорбции ацетонитрила на кинетику и механизм электрокристаллизации меди на монокристаллах Pt(111) высокого качества в водном сернокислом растворе. Исследования проведены с помощью электрохимического сканирующего зондового микроскопа.

Процессы электрохимической адсорбции и нуклеации металлов на инородных подложках имеют важное фундаментальное и прикладное значение, их изучение весьма актуально, поскольку модифицирование поверхности электродов наноразмерными объектами (монослои, островковые пленки, квантовые точки и проводники) стало одним из основных направлений развития электрохимических нанотехнологий. Процесс электрокристаллизации меди широко применяется в промышленности, а также интересен в качестве модельной системы для изучения сложных электрохимических процессов со стадийным разрядом ионов. Особое значение методология металлизации проводящих полимеров приобретает для электрохромных устройств и гальванических процессов в органических и водно-органических средах.

Органические вещества часто используют в качестве добавок в электролиты для модификации свойств гальванических покрытий, например для получения мелкокристаллических, блестящих, декоративных, пластичных, коррозионно-стойких осадков и т.д. Механизм действия добавок всегда интересовал специалистов, а появление сканирующей зондовой микроскопии позволило получить новую уникальную информацию по этой проблеме.

Целью настоящей работы является изучение влияния адсорбции ацетонитрила (AcN) на кинетику и механизм электрокристаллизации меди на монокристаллах Pt(111) высокого качества в водном сернокислом растворе.

С помощью сканирующей зондовой микроскопии подтвержден предложенный на основе электрохимических измерений механизм увеличения скорости осаждения медного осадка на платине в присутствии AcN. Исследование проводилось с использованием технологии подготовки и очистки поверхности электродов, развитой в работах [1, 2]. Растворы электролитов готовили из реагентов о.с.ч. и Milli-Q воды. Аликвоты ацетонитрила добавляли в ячейку объемом 50 мл с помощью микропипетки для получения необходимой концентрации AcN. Аргон высокой чистоты применяли для деаэрации растворов, во время экспериментов инертный газ продували над раствором. Подробности методики эксперимента описаны в [3]. Все потенциалы приведены по шкале нормального водородного электрода (НВЭ).

Эксперимент. Морфологию поверхности электрода и осадков изучали с помощью сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) «Solver Pro EC» (НТ-МДТ, Зеленоград, Россия), позволяющего проводить измерения в режимах сканирующего туннельного (СТМ) или атомно-силового (АСМ) микроскопа на воздухе и в растворах. В комплектации данного прибора имеется бипотенциостат, который использовали в работе вместе со стеклянной ячейкой для проведения электрохимических измерений.

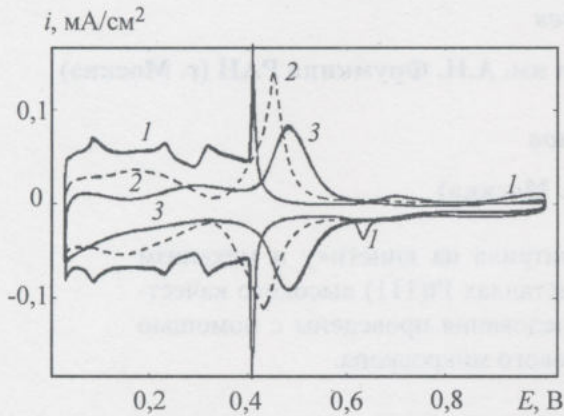


Рис.1. ЦВА Pt(111) в растворе 0,5 М H_2SO_4 с добавками АсN, мМ: 1 – 0; 2 – 0,2; 3 – 200 (скорость развертки потенциала 100 мВ/с)

Циклическая вольт-амперограмма (ЦВА) Pt(111) в фоновом растворе 0,5 М H_2SO_4 представлена на рис.1,а (кривая 1). Она характеризует монокристаллический электрод с хорошо упорядоченной структурой поверхности (рис.2). На СТМ-изображении поверхности Pt(111) хорошо видны ступени моноатомной высоты, однако террасы достаточно широкие (со средней шириной около 100 нм). В присутствии АсN профиль ЦВА существенно изменяется. Адсорбированный ацетонитрил прочно связан с поверхностью платины и частично блокирует адсорбционные места для водорода и бисульфата, смещая область адсорбции анионов к более положительным потенциалам (рис.1,а, кривые 2, 3) [3].

Установлено, что АсN способен пассивировать поверхность Pt-электрода и что не только процесс выделения водорода, но другие катодные процессы, например восстановление металлов, могут существенно зависеть от адсорбции АсN. Это предположение подтверждено в экспериментах по осаждению Cu.

Кинетику нуклеации и роста металлического осадка меди на Pt(111) изучали на основании экспериментальных зависимостей тока от времени при потенциостатической поляризации. Равновесный потенциал меди в растворе 0,5 М H_2SO_4 + 0,01 М CuSO_4 равен 0,25 В по НВЭ. На рис.3 показаны временные зависимости тока осаждения меди при потенциалах $E_{\text{осж}}$, равных 0,15 и 0,05 В ($t \leq 50$ с), и ее растворения при $E_{\text{рас}} = 0,30$ В ($t > 50$ с), полученные в чистом растворе и с добавкой АсN.

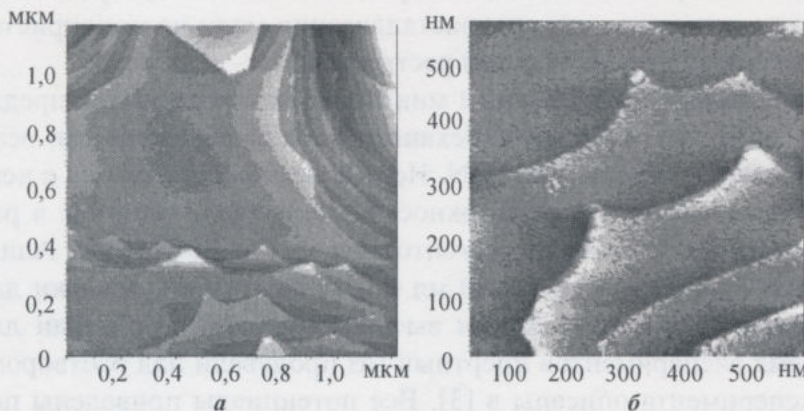


Рис.2. СТМ-изображения поверхности Pt(111) с разной шкалой высот: а – 2,8 нм; б – 1,4 нм

Установлено, что в присутствии 40 мМ ацетонитрила наблюдается типичное снижение токов, характеризующих процесс осаждения Cu с увеличением перенапряжения (кривые 3,4 при $t = 5-50$ с).

Обсуждение результатов. Данные кулонометрии, анализ кривых растворения осадка показывает, что в растворе без добавки AcN количество осадка монотонно увеличивается с ростом перенапряжения. В растворе, содержащем 40 мМ ацетонитрила, во-первых, количество осадка увеличивается, а, во-вторых, при $E_{\text{осж}} = 0,15$ В наблюдается максимум на кривой $i(t)$. Подобный эффект наблюдался для Pt(111) в слабокислых растворах без добавки AcN [4]. Такая экстремальная зависимость количества осадка от перенапряжения была описана в работах [3, 4]. Наличие этого максимума можно объяснить следующим образом. В растворе с добавкой образуется меньшее количество зародышей (большие расстояния между ними) и перекрытие диффузионных зон происходит через больший промежуток времени, чем в чистом сульфатном растворе (рис.4). В этом случае реализуется смешанный контроль роста «полусферическая диффузия + перенос заряда». Полусферическая диффузия обеспечивает более интенсивный поток ионов к местам роста, чем диффузия к плоскости, которая реализуется после перекрывания зон. Для проверки данного предположения использовался сканирующий зондовый микроскоп.

Ex situ атомно-силовой режим достаточно прост с методической точки зрения и поэтому весьма удобен для изучения морфологии электролитических осадков. Из рис.5,а-г видно, что при $E_{\text{осж}} = 0,15$ В в растворе с добавкой образуется меньшее число зародышей, чем в растворе без добавки, и их размер значительно больше, в том числе и по высоте.

При высоких перенапряжениях $E_{\text{осж}}$ (от 0,05 до 0,07 В) количество осадка в растворах без добавки и с 40 мМ ацетонитрила приблизительно одинаково (см.рис.3,б). В этих условиях в обоих растворах образуется большое количество центров кристаллизации (рис.5,д,е) и быстрое перекрывание диффузионных зон приводит к снижению скорости роста в условиях предельной диффузии.

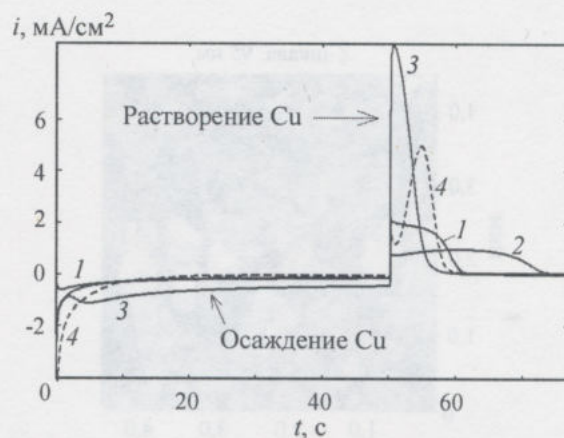


Рис.3. Потенциостатические зависимости тока осаждения металлической меди на Pt(111) ($t \leq 50$ с) и ее растворения при 0,3 ($t > 50$ с). Концентрация AcN в растворе, мМ: кривые 1, 3 – 0; кривые 2, 4 – 40. Потенциалы $E_{\text{осж}}$, В: кривые 1, 3 – 0,15; кривые 2, 4 – 0,05

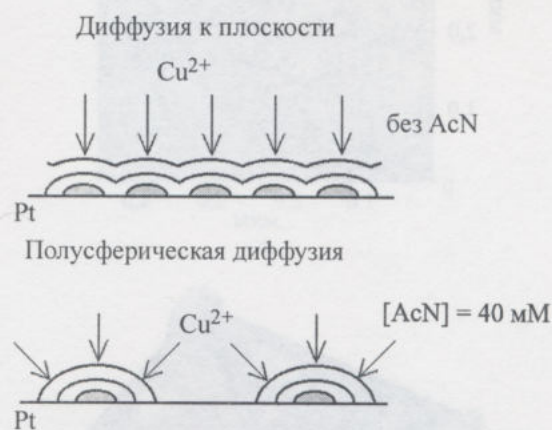


Рис.4. Схематичное изображение потока электроактивных ионов меди к электродной поверхности при линейной и полусферической диффузиях

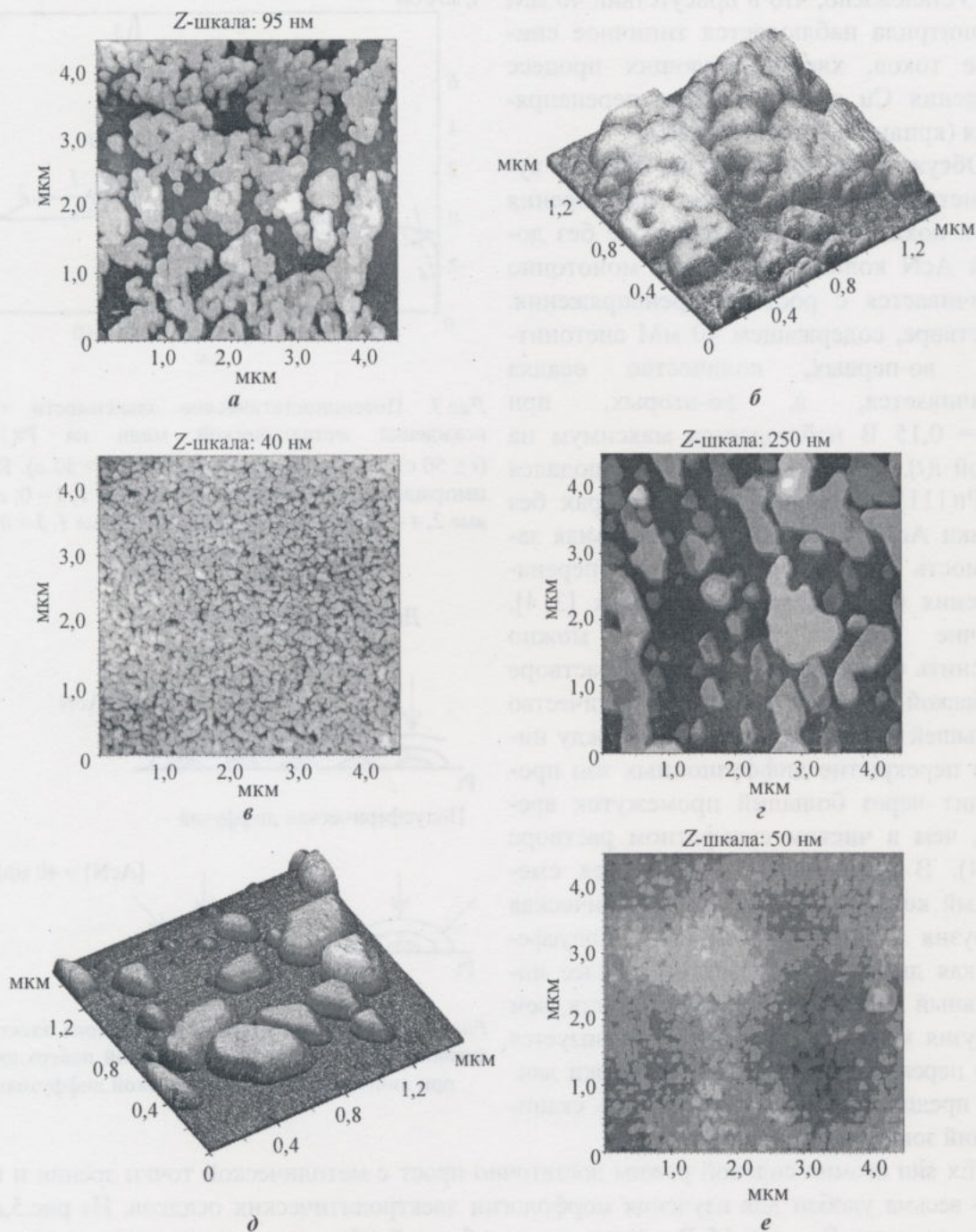


Рис.5. АТМ-изображения осадка меди на Pt(111), полученные при потенциалах $E_{\text{осж}}$, равных 0,15 В (а, б, з, д,) и 0,05 В (в, е). Концентрация АсN в растворе, мМ: а-в – 0; з-е – 40. Вертикальный масштаб, нм: а – 95; б – 65; в – 40; з – 250; д – 110; е – 50

Таким образом, максимальная скорость роста осадка соответствует оптимальному числу кристаллитов и оптимальному расстоянию между растущими центрами в условиях смешанной кинетики «диффузия + перенос заряда».

Анализируя потенциостатические кривые растворения осадка, можно сделать следующие выводы. В растворе без добавки АсN кривые растворения соответствуют довольно компактным осадкам (наблюдается площадка тока), с уменьшением $E_{\text{осж}}$ от 0,15 до 0,05 В

степень компактности возрастает, осадок становится более однородным (см. рис.3 и 5,а-в). В присутствии 40 мМ ацетонитрила кривые растворения (как и АСМ-изображения поверхности) резко отличаются от полученных в чистом растворе (рис.3 и 5, г-е). Наблюдается скачок тока, который свидетельствует о неравномерности осадка.

Использование сканирующего зондового микроскопа в комбинации с классическими электрохимическими методами позволяет установить четкую корреляцию между потенциостатическими кривыми растворения меди и морфологией осадка.

Литература

1. *Clavilier J., Armand D., Sun S.G., Petit M.* Potential-dependent sum frequency generation study of 5-methylbenzotriazole on polycrystalline copper, platinum and gold / *J. Electroanal. Chem.* – 1986. – Vol. 205. – P. 267–275.
2. *Clavilier J.* Flame-annealing and cleaning technique // *Interfacial Electrochemistry. Theory, Experimental and Applications* / *Ed. A.Wieckowski.* – N.Y.: Marcel Dekker, Inc., 1999. – P. 231–247.
3. Кинетика формирования адатомного слоя и нуклеации меди на грани Pt(111) в присутствии ацетонитрила / *А.В.Руднев, Е.Б.Молодкина, А.И.Данилов и др.* // *Электрохимия.* – 2006. – Т. 42. – С. 432–445.
4. Kinetics of copper deposition on Pt(111) and Au(111) electrodes in solutions of different acidities / *A.I.Danilov, E.B.Molodkina, A.V.Rudnev et al.* // *Electrochim. Acta.* – 2005. – Vol. 50. – P. 5032.

Статья поступила
26 мая 2008 г.

Руднев Александр Викторович – научный сотрудник лаборатории строения поверхностных слоев Института физической химии и электрохимии им. А.Н.Фрумкина РАН (г. Москва). *Область научных интересов:* процессы электрохимической адсорбции и нуклеации металлов на инородных подложках.

Хлынов Александр Вячеславович – инженер-разработчик ЗАО НТ-МДТ (г. Москва). *Область научных интересов:* разработка оборудования для проведения экспериментов в области электрохимии.

Информация для читателей журнала

«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Вы можете оформить подписку на 2009 г. в редакции с любого номера.

Стоимость одного номера – 600 руб. (с учетом всех налогов и почтовых расходов).

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

Тел.: 8-499-734-62-05. Факс: 8-499-710-54-29. E-mail: magazine@rnd.miee.ru

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

ТЕХНОЛОГИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.3.049.77

Методы устранения дефектов топологии интегральных микросхем на фотошаблонах

В.А.Беспалов, В.А.Овчинников, Д.В.Базанов

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

С.М.Аваков

Научно-производственное республиканское унитарное предприятие
«КБТЭМ-ОМО» (Минск, Беларусь)

Проанализированы методы устранения дефектов топологии интегральных микросхем на фотошаблонах. Выявлены наиболее эффективные методы устранения прозрачных и непрозрачных дефектов при производстве фотошаблонов под уровень ИС с нормами до 90 нм.

Технологический процесс формирования топологии интегральных схем на фотошаблонах является основой при производстве ИМС. Топология современной интегральной схемы представляет собой сложную структуру, состоящую из десятков и сотен миллионов геометрических фигур. Генерирование такой структуры на металлизированном фотошаблоне в точном соответствии с проектными данными за один цикл фотолитографии представляет собой неразрешимую задачу. Поэтому неотъемлемой частью технологического процесса изготовления фотошаблонов является операция устранения обнаруженных дефектов, так как наличие лишь только одного пропущенного дефекта в одном слое интегральной схемы делает ее неработоспособной и, следовательно, приводит к многомиллионным убыткам [1].

Оборудование для устранения дефектов маскирующего покрытия фотошаблонов, так же как и оборудование для автоматического контроля соответствия топологического рисунка фотошаблона проектным данным и поиска дефектов, является достаточно дорогостоящим, особенно при использовании технологии раздельного устранения прозрачных и непрозрачных дефектов. При этом для устранения прозрачных дефектов используется, как правило, ионно-лучевая или электронно-лучевая установки, а для устранения непрозрачных дефектов – электромеханическая установка с микрозондом или импульсный лазер с малой длительностью импульса.

Каждый конкретный вид дефектов маскирующего покрытия фотошаблона является следствием нарушения технологических процессов при формировании скрытого изображения топологического рисунка фотошаблона на генераторе изображения (ГИ), химической обработки проэкспонированной пластины, нарушения выполнения требований вакуумной гигиены в чистых производственных помещениях, а также зависит от качества фотошаблонных заготовок и применяемых материалов. Характерные дефекты и причины их появления на фотошаблонах представлены в табл.1.

Таблица 1

Основные виды дефектов фотошаблонов и причины их появления

Вид дефекта	Предполагаемые причины появления дефектов
Разрыв, перемычка на топологическом элементе фотошаблона	Повышенная запыленность в помещении, дефект маскирующего покрытия фотошаблонной заготовки, низкая адгезия маскирующего покрытия к стеклянной подложке фотошаблонной заготовки
Остатки маскирующего покрытия	Нарушение условий вакуумной гигиены, дефекты и включения в фоторезисте, загрязнения химических растворов (проявителя, травителя маскирующего покрытия), нарушение технологических режимов травления
Прокол маскирующего покрытия	Дефект маскирующего покрытия шаблонной заготовки, дефект фоторезистивной маски, ошибка режима химической обработки проэкспонированных пластин, например, неправильно выбраны концентрация проявителя, время проявления фоторезиста
Вырыв на краю элементов топологического рисунка фотошаблона	Низкая адгезия маскирующего покрытия к стеклу фотошаблонной заготовки, низкая адгезия фоторезиста к маскирующему покрытию фотошаблона
Отсутствие элемента	Повышенная запыленность в производственных помещениях во время экспонирования фоторезиста, включения в фоторезисте, наличие инородных частиц на поверхности фоторезиста

В зависимости от сложности изготавливаемого фотошаблона и наличия специального технологического оборудования можно использовать различные технологические процессы поиска и устранения дефектов. Методы обнаружения и устранения дефектов при производстве фотошаблонов представлены в табл.2

Таблица 2

Методы обнаружения и устранения дефектов фотошаблонов

Тип фотошаблона		
Фотошаблон в масштабе 10:1 для технологии уровня 1,5 мкм и более	Фотошаблон в масштабе 5:1 для технологии уровня от 0,8 до 1,5 мкм	Фотошаблон в масштабе 5:1 или 4:1 для технологии уровня менее 0,8 мкм
Методы поиска дефектов		
1. Визуальный контроль при помощи микроскопа с увеличением не менее 200 ^x . 2. Телевизионная микроскопия. 3. Оптическое наложение изображений, сравнение двух модулей одного фотошаблона. 4. Обнаружение дефектов топологического рисунка фотошаблона методом сравнения с исходными проектными данными на установке автоматического контроля	1. Оптическое наложение изображений, сравнение двух модулей одного фотошаблона. 2. Обнаружение дефектов топологического рисунка фотошаблона методом сравнения с исходными проектными данными на установке автоматического контроля	1. Обнаружение дефектов топологического рисунка фотошаблона методом сравнения с исходными проектными данными на установке автоматического контроля

Тип фотошаблона		
Фотошаблон в масштабе 10:1 для технологии уровня 1,5 мкм и более	Фотошаблон в масштабе 5:1 для технологии уровня от 0,8 до 1,5 мкм	Фотошаблон в масштабе 5:1 или 4:1 для технологии уровня менее 0,8 мкм
Методы устранения прозрачных дефектов		
1. Объемная ретушь. 2. Маскирование полупрозрачными материалами. 3. Двойное маскирование. 4. Обратная литография. 5. Лазерно-стимулированное осаждение металлоорганического вещества из газообразной фазы. 6. Электронное стимулированное осаждение металлоорганического вещества. 7. Формирование ионным лучом фазовых решеток, призм в области прозрачного дефекта	1. Обратная литография. 2. Маскирование полупрозрачными материалами. 3. Лазерно-стимулированное осаждение металлоорганического вещества из газообразной фазы. 4. Электронное стимулированное осаждение металлоорганического вещества. 5. Формирование ионным лучом фазовых решеток, призм в области прозрачного дефекта	1. Лазерно-стимулированное осаждение металлоорганического вещества из газообразной фазы. 2. Электронное стимулированное осаждение металлоорганического вещества. 3. Формирование ионным лучом фазовых решеток, призм в области прозрачного дефекта
Методы устранения непрозрачных дефектов		
1. Удаление участков хрома (непрозрачных дефектов) электромеханическим микрозондом. 2. Испарение участков хрома (непрозрачных дефектов) импульсным лазером. 3. Устранение непрозрачных дефектов фотошаблона методом ионного распыления. 4. Распыление участков хрома (непрозрачных дефектов) при помощи реагента, стимулированного электронным лучом		

Методы обнаружения дефектов фотошаблонов с использованием визуального контроля при помощи микроскопа, телевизионной микроскопии, оптического наложения изображения характеризуются высокой трудоемкостью, достоверностью контроля не более 90%, проблемой точного определения координат дефектов. Для рассмотренных методов минимальный обнаруживаемый дефект составляет 1 мкм.

При обнаружении дефектов топологического рисунка фотошаблона методом сравнения с исходными проектными данными все несовпадения классифицируются как дефект с точным указанием его размера и местоположения на поверхности фотошаблона. Величина обнаруживаемого дефекта зависит от технических характеристик установки. Например, на установке автоматического контроля ЭМ-6329 («КБТЭМ-ОМО», Беларусь) минимальный обнаруживаемый дефект равен 0,25 мкм, время контроля одного фотошаблона 1 ч, достоверность контроля 99,9%.

Методы устранения прозрачных дефектов маскирующего покрытия фотошаблона. Для устранения обнаруженных прозрачных дефектов используются следующие методы: объемная ретушь, маскирование полупрозрачной пленкой, двойное маскирование, обратная литография, лазерно-стимулированное осаждения металлоорганического вещества из газообразной фазы, электронное стимулированное осаждение металлоорганического вещества, формирование ионным лучом фазовых решеток, призм в области прозрачного дефекта.

Метод устранения дефектов при помощи объемной ретуши представляет собой самый простой способ устранения дефектов маскирующего покрытия. Обнаруженные при визуальном контроле дефекты типа прокол, вырыв устраняются при помощи объемной ретуши на основе эпоксидных смол с наполнителями, не пропускающими свет с длиной волны $\lambda = 436$ нм, после чего фотошаблон подвергается температурной обработке (рис.1).

Преимуществами данного метода являются простота и низкая стоимость технологической операции, а недостатками – большая неровность края формируемых элементов и неконтролируемое разрушение нанесенного покрытия при отмывке фотошаблона. Кроме того, минимальный размер капли ретуши составляет 30–50 мкм, что позволяет устранять дефекты только на фотошаблонах для ИС малой степени интеграции. Указанные недостатки обуславливают ограниченность применения данного метода.

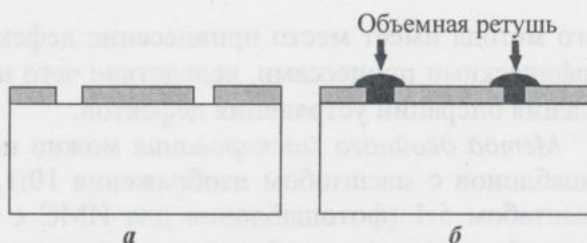


Рис. 1. Устранение дефектов при помощи объемной ретуши на основе эпоксидных смол: а – обнаруженные дефекты при визуальном контроле фотошаблона; б – нанесение объемной ретуши в область дефекта с последующей термообработкой

Метод устранения локальных дефектов при помощи маскирования полупрозрачной пленкой окиси железа может использоваться для исправления дефектов фотошаблонов с масштабом изображения 10:1, а также для некоторых фотошаблонов с масштабом 5:1 (фотошаблонов для ИМС с малой степенью интеграции). Размер минимального элемента для таких фотошаблонов не может быть меньше 5 мкм. Соответствующий технологический процесс схематично представлен на рис.2. До начала визуального контроля на поверхность фотошаблона с проколами в маскирующем слое наносится полупрозрачная пленка окиси железа методом пиролитического осаждения из пентакарбонила железа или напылением в вакуумной установке. Обнаруженные дефекты при визуальном контроле маскируются при помощи фоторезиста или объемной ретуши на основе эпоксидной смолы и после межоперационной термообработки фотошаблон передается на операцию травления. При проведении операции жидкостного травления уничтожается вся пленка полупрозрачного материала кроме замаскированных областей, после чего фоторезист или эпоксидная смола удаляется.

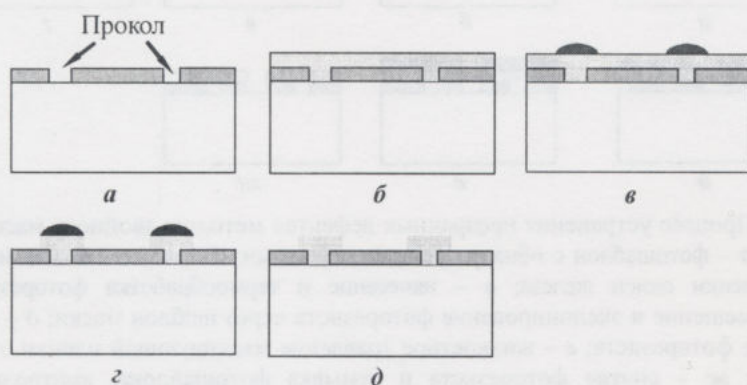


Рис. 2. Устранение прозрачных дефектов методом маскирования полупрозрачной пленкой: а – обнаруженные дефекты типа прокол; б – нанесение маскирующей пленки окиси железа; в – нанесение фоторезиста или объемной ретуши в область дефекта и термообработка; г – жидкостное травление маскирующей пленки окиси железа; д – снятие с поверхности фотошаблона фоторезиста или объемной ретуши

Преимуществами метода являются хорошая адгезия наносимого материала и принципиальная возможность устранения дефектов на краях элементов топологии, а недостаток – необходимость использования дополнительной установки пиролитического осаждения или установки вакуумного напыления. Кроме того, при использовании дан-

ного метода имеет место привнесение дефектов, связанных с дополнительными литографическими процессами, вследствие чего необходим вторичный контроль после проведения операции устранения дефектов.

Метод двойного маскирования можно использовать для устранения дефектов фотошаблонов с масштабом изображения 10:1, а также для некоторых фотошаблонов с масштабом 5:1 (фотошаблонов для ИМС с малой степенью интеграции). Соответствующий технологический процесс с использованием установок контактной печати схематично представлен на рис.3. До начала технологической операции устранения дефектов необходимо изготовить технологическую маску промежуточного шаблона с топологическим рисунком, аналогичным тому, который необходимо ремонтировать, но с зеркальным изображением, а также нанести полупрозрачную пленку окиси железа методом пиролитического осаждения из пентакарбонила железа или напылением в вакуумной установке и пленку фоторезиста. Для компенсации ошибки ориентации промежуточного шаблона и маски на установке совмещения и экспонирования размеры топологических элементов делают большими на 0,8 мкм на сторону по сравнению с ремонтируемым фотошаблоном. На установке контактной печати проводится совмещение и экспонирование фотошаблона и маски. После проявления фоторезиста, жидкостного травления пленки окиси железа, снятия фоторезиста и отмывки фотошаблон необходимо проверить на наличие остатков маскирующего покрытия. Данный метод можно использовать, применяя генераторы изображения, где изображение шаблона маски формируется по заданной управляющей информации.

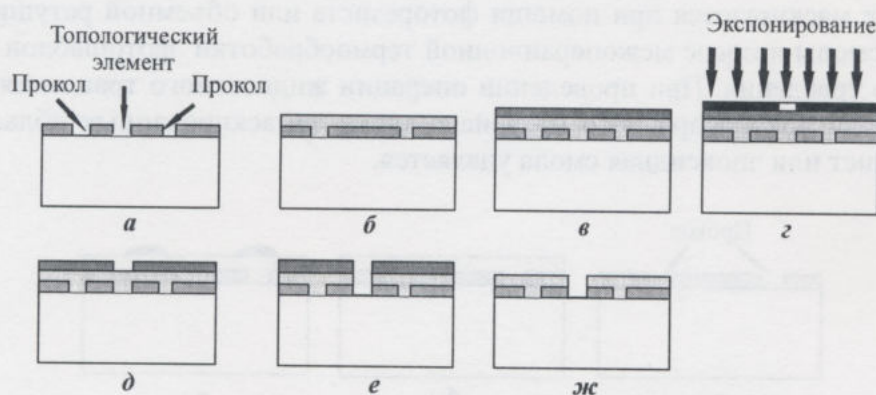


Рис.3. Процесс устранения прозрачных дефектов методом двойного маскирования: а – фотошаблон с обнаруженными дефектами; б – нанесение маскирующей пленки окиси железа; в – нанесение и термообработка фоторезиста; г – совмещение и экспонирование фоторезиста через шаблон маски; д – проявление фоторезиста; е – жидкостное травление маскирующей пленки окиси железа; ж – снятие фоторезиста и отмывка фотошаблона, контроль на наличие недопустимых дефектов типа остатки маскирующего покрытия

Преимущества метода являются хорошая адгезия наносимого материала, устранение всех проколов маскирующего покрытия без проведения операции поиска этих дефектов, а недостатками – необходимость изготовления фотошаблона маски, использование дополнительной установки пиролитического осаждения или установки вакуумного напыления, установки нанесения и сушки фоторезиста. Кроме того, возможно привнесение дефектов типа остатки маскирующего покрытия при травлении защитной пленки полупрозрачного материала, поиск которых затруднен из-за ее полупрозрачности, так как отсутствует резкий контраст изображения. Качество и величина ремонтируемых краевых дефектов определяется точностью совмещения фотошаблона и маски, а также величиной технологической коррекции на размеры топологических элементов.

Метод устранения прозрачных дефектов обратной литографией (*lift-off process*) достаточно распространен при ремонте фотошаблонов масштабом 5:1, изготавливаемых для технологии производства ИС уровня от 0,8 до 1,5 мкм (рис.4). При контроле рабочего поля фотошаблона фиксируются координаты расположения дефектов типа прокол, вырыв. На поверхность фотошаблона наносится фоторезист, который подвергается термообработке. Селективное экспонирование в зоне дефекта осуществляется через прямоугольную диафрагму лазерной установки устранения дефектов, например ЭМ-551Б. В процессе операции проявления фоторезист в зоне экспонирования удаляется. При напылении хрома по всей поверхности фотошаблона происходит заполнение проявленных областей, а при взрывном удалении фоторезиста в растворителе, оставшийся фоторезист удаляется вместе с лишним металлом, так что хром остается только в тех местах, где были отверстия с напыленным металлом.

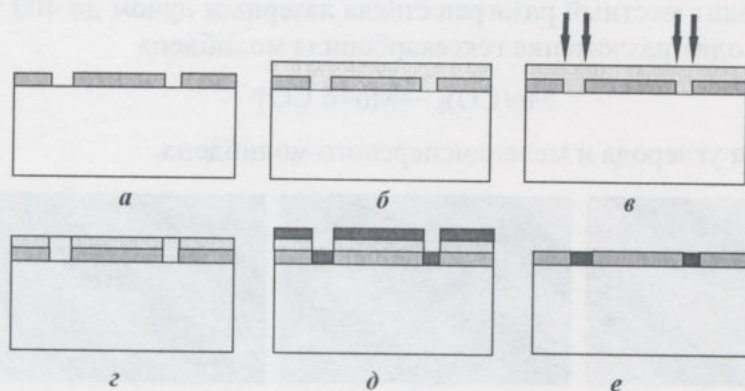


Рис.4. Процесс устранения прозрачных дефектов методом обратной литографии: а – фотошаблон с обнаруженными прозрачными дефектами; б – нанесение фоторезиста и термообработка; в – селективное экспонирование фоторезиста в зоне дефекта лазером; г – проявление фоторезиста; д – напыление хрома по всей поверхности фотошаблона; е – взрывное удаление фоторезиста в растворителе

Преимуществом метода является высокая степень адгезии напыленного металла, при этом формируется «планарная заплатка» толщиной, соизмеримой с толщиной основного маскирующего слоя, что обеспечивает возможность устранения краевых дефектов элементов топологии. К недостаткам следует отнести длительность и сложность процесса, что часто приводит к порче шаблона из-за привнесения дополнительных дефектов во время проведения литографических операций.

Метод устранения прозрачных дефектов с помощью ионно-лучевой установки используется для вытравливания в стеклянном шаблоне с помощью ионного луча оптических микроструктур – фазовых решеток, призм и различных линзоподобных структур, которые становятся «непрозрачными» для ультрафиолетового излучения установок проекционной печати, так как призматическая структура блокирует падающее излучение настолько же эффективно, как и хромовое покрытие (рис.5).

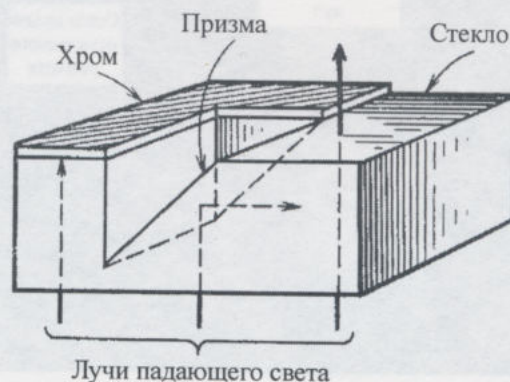
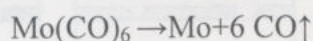


Рис.5. Призматическая структура, вытравленная в стеклянной поверхности

Преимуществами метода являются стабильный характер ремонта, невозможность случайного удаления структуры, высокая точность позиционирования (100 нм) возможность «залечивания» прозрачных дефектов с субмикронной точностью [2]. К недостаткам следует отнести необходимость рассчитывать форму призматических линз для различных типов стекла шаблона (кварц, щелочное) и учитывать такие процессы, как ионная имплантация, радиационное повреждение или распыление материала поверхности шаблона.

Метод устранения прозрачных дефектов с использованием лазерно-стимулированного осаждения металлоорганического вещества из газообразной фазы является одним из основных для ремонта дефектов сложных фотошаблонов [3]. Осаждение металла на прозрачный дефект осуществляется путем лазерного стимулирования, например, гексакарбонила молибдена из газообразной фазы (рис.6). При этом в зоне осаждения происходит местный разогрев стекла лазерным лучом до 400 °С, в результате которого происходит разложение гексакарбонила молибдена



с выделением окиси углерода и мелкодисперсного молибдена.

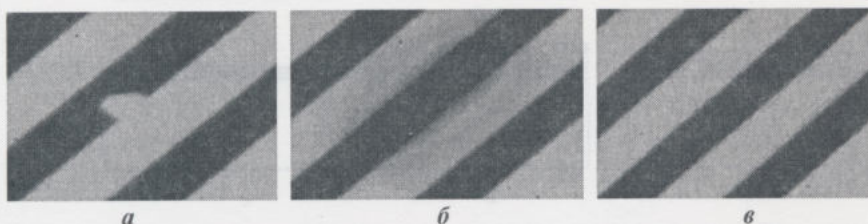


Рис.6. Устранение прозрачного дефекта методом осаждения металлоорганического вещества из газообразной фазы: а – обнаруженный дефект маскирующего покрытия типа вырыв; б – осаждение металлоорганического вещества из газообразной фазы; в – удаление краевого распыления осаждаемого вещества с помощью лазерного испарения

Преимуществами метода являются хорошая адгезия наносимого материала, возможность устранения дефектов на краях элементов топологии, возможность «залечивания» прозрачных дефектов с субмикронной точностью, стабильный характер процесса, поскольку осажденный металл нельзя удалить случайно или по небрежности. Недостатки – необходимость устранять распыленное вещество на краях элемента.

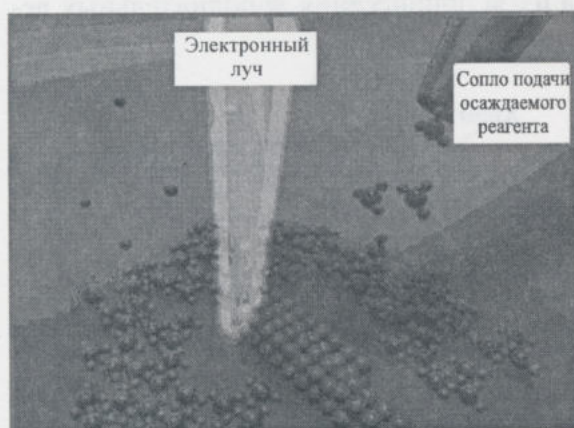


Рис.7. Осаждение металла на прозрачный дефект

Метод электронного стимулированного осаждения металлоорганического вещества используется для осаждения металла во время электронного стимулирования малой энергией специального вещества в зоне наличия дефекта [4]. Координаты и площадь ремонтируемого дефекта для осаждения задаются с рабочей станции оператора. В зону ремонта через сопло подается специальный реагент (рис.7).

Преимуществами метода являются хорошая адгезия наносимого материала, возможность устранения дефектов на краях элементов топологии, при этом из-

менение размера элемента топологического рисунка менее 3 нм, возможность «залечивания» прозрачных дефектов сложной конфигурации с субмикронной точностью. К недостаткам следует отнести сложность установки устранения дефектов, необходимость компенсации «паразитного» заряда электронов на поверхности фотошаблона.

Методы устранения непрозрачных дефектов. Непрозрачные дефекты фотошаблонов типа перемычка, выступ, остаток маскирующего покрытия устраняются при помощи специального технологического оборудования ремонта фотошаблонов: электронно-лучевой, ионно-лучевой, лазерной, электромеханической установок. Алгоритм работы перечисленных установок один – необходимо устранить ненужные участки хрома с заданной точностью в нужном месте, не повредив при этом соседние элементы топологического рисунка, стеклянную подложку, и обеспечить бездефектное изображение топологического рисунка фотошаблона.

Метод устранения непрозрачных дефектов при помощи ионно-лучевой установки основан на ионном распылении остатков маскирующего покрытия – хрома. Поскольку процесс является нетермическим, воздействию подвергаются только те участки фотошаблона, на которые непосредственно попадает ионный луч. Одно из преимуществ состоит в том, что ионный луч может быть сфокусирован в пятно диаметром 0,1 мкм и менее. Путем тщательного позиционирования ионного луча и управления скоростью распыления можно, например, с высокой точностью отрегулировать положение края линии. К недостаткам следует отнести ионную имплантацию, радиационное повреждение или распыление материала поверхности шаблона, так как ионный луч одновременно используется для отображения фрагментов шаблона и для выполнения ремонта. Кроме того, необходимо обеспечить нейтрализацию заряда в связи с тем, что стеклянные фотошаблоны являются очень хорошими изоляторами и обладают способностью поглощать заряд, а это может нарушать работу установки из-за отклонения луча.

Метод устранения непрозрачных дефектов при помощи электронно-лучевой установки аналогичен методу устранения прозрачных дефектов. В качестве основного процесса при ремонте фотошаблонов используется химический процесс вытравливания остатков хрома при взаимодействии электронного луча со специальным реагентом, подаваемым через дозирующее сопло в зону дефекта. Координаты и площадь дефекта для травления задаются с рабочей станции оператора. Преимуществами метода является возможность устранять краевые дефекты с высокой точностью (7 нм) и различные маскирующие покрытия фотошаблонов (Cr, TaN, MoSi, SiC, Si). К недостаткам следует отнести необходимость обеспечить нейтрализацию заряда, так как стеклянные фотошаблоны являются очень хорошими изоляторами и обладают способностью накапливать заряд на поверхности фотошаблона, а это может привести к искажению формы электронного луча и погрешности позиционирования из-за его отклонения.

Метод устранения непрозрачных дефектов на электромеханической установке (например, SPR6300) в настоящее время используют некоторые зарубежные производители фотошаблонов. Принцип устранения дефектов основан на механическом скрабировании участка с остатками маскирующего покрытия специальным алмазным зондом. В заданную координату расположения дефекта вводится алмазный зонд, который механическим воздействием устраняет дефект [5]. На рис.8. показана принципиальная схема устранения дефекта, фотографии образцов до и после устранения дефекта.

Преимуществом метода является возможность устранения любых металлов с поверхности фотошаблона, которые применяются для формирования маскирующего слоя и фазосдвигающих элементов – PSM (хром, силицид молибдена, соединения углерода). Недостатки – высокая стоимость, критичность оборудования к уровню настройки и соблюдению технологического процесса, так как имеется вероятность катастрофического повреждения стеклянной подложки фотошаблона.

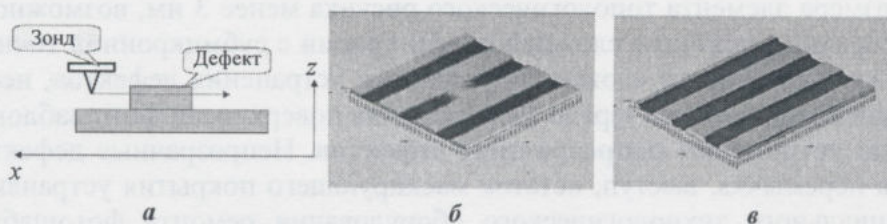


Рис.8. Устранение дефектов алмазным зондом: а – схема устранения дефекта; б – непрозрачный дефект маскирующего покрытия; в – дефект устранен

Метод лазерного испарения участка хрома при помощи лазера с малой длительностью импульса основан на принципе, когда металл сначала плавится, а затем испаряется (рис.9). Достоинством метода является простота и технологичность процесса. В зависимости от длины волны лазерного источника минимальный размер устраняемого дефекта может быть от 200 до 500 нм. Возможно устранение как отдельно стоящих дефектов, так и дефектов края по заданной программе. Малая длительность импульса лазера позволяет свести к минимуму неровность края ремонтируемого элемента и повреждения стеклянной подложки. К недостаткам следует отнести необходимость пробного испарения в нерабочей площади с целью соблюдения энергетических режимов на данной поверхности маскирующего покрытия фотошаблона.

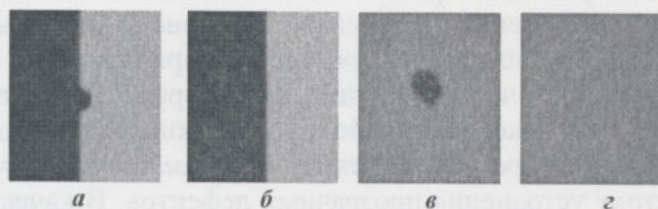


Рис.9. Устранение дефектов маскирующего покрытия лазером с малой длительностью импульса: а – обнаруженный дефект типа выступ на краю топологического элемента фотошаблона; б – дефект устранен; в – обнаруженный дефект типа остаток хрома; г – дефект устранен

Анализ методов устранения прозрачных и непрозрачных дефектов показал, что предпочтение при изготовлении бездефектных фотошаблонов в масштабе 5:1 или 4:1 для технологии изготовления ИМС уровня 0,8–0,09 мкм необходимо отдать электронно-лучевому и лазерному методам, так как, во-первых, эти методы обеспечивают процесс устранения прозрачных и непрозрачных дефектов с заданными техническими характеристиками, а во вторых, что очень существенно, устранение прозрачных и непрозрачных дефектов можно выполнять в едином технологическом цикле на одной установке. При этом надо учитывать, что электронно-лучевой метод, с одной стороны, обеспечивает высокое разрешение процесса, но с другой – характеризуется невысокой производительностью, сложностью технологического процесса. Лазерные методы, напротив, характеризуются высокой производительностью и относительной простотой технологического процесса и низкой стоимостью оборудования, но при этом обеспечивают менее высокое разрешение. Очевидно, что при этом необходимо отдать предпочтение методам, обеспечивающим меньший уровень затрат.

Например, на производственной линии Центра фотошаблонов МИЭТ при изготовлении фотошаблонов для ИМС с проектными номами до 0,25 мкм с успехом используется установка лазерной ретуши фотошаблонов ЭМ-5001Б («КБТЭМ-ОМО», Беларусь).

Размер минимального устраняемого непрозрачного дефекта составляет 400 нм, неровность края не превышает 500 нм, погрешность наведения луча лазера не более 0,5 мкм. Минимальный диаметр осаждаемого вещества на поверхность фотошаблона не более 2 мкм.

Для устранения дефектов маскирующего покрытия фотошаблонов под уровень ИС с проектными нормами 180–90 нм целесообразно использовать электронно-лучевую установку MeRiT® MG 45, которая имеет точность воспроизведения 7 нм (3 сигмы), изменение ширины линии $CD < 3$ нм и позволяет устранять дефекты маскирующих покрытий, применяемых при формировании фазосдвигающих элементов (PSM).

Литература

1. Аваков С.М., Карпович С.Е., Овчинников В.А., Титко Е.А. Операции контроля топологии в технологическом процессе изготовления фотошаблонов // Электроника инфо. – 2008. – № 1. – С. 43.
2. Ионно-лучевая установка для ремонта фотошаблонов // Электроника. – № 1. – 1986. – Т. 59. – С. 99, 100.
3. Оптико-механические комплексы для бездефектного изготовления фотошаблонов 0,35 мкм и 90 нм / С.М.Аваков, С.Е.Карпович, В.А.Овчинников и др. // Фотоника. – 2007. – № 6. – С. 35–37.
4. Ehrlich I.C., Edinger K., Boegli V., Kuschnerus P. Application data of the electron beam based photomask repair tool MeRiT MG // Lectures Held at the GMM Conference. EMLC. – 2005. – P. 125–129.
5. White R., Verbeek M., Bozak R., Klos M. Use of nanomachining as a technique to reduce scrap of high-end photomasks. // 21-st Annual BACUS Symposium on Photomask Technology / Ed. G.T. Dao, B.J. Grenon. – 2002. – Vol. 4562. – P. 213–224.

Статья поступила
28 июля 2008 г.

Овчинников Вячеслав Алексеевич – начальник отдела Центра коллективного пользования «Микросистемная техника и элементно-компонентная база» МИЭТ. *Область научных интересов:* методы, модели, алгоритмы технологических процессов изготовления бездефектных фотошаблонов для сложных интегральных схем.

Беспалов Владимир Александрович – доктор технических наук, проректор МИЭТ по научной и инновационной деятельности. *Область научных интересов:* технология ИС на основе сложных полупроводников, фотоэлектроника, зондовая микроскопия.

Базанов Дмитрий Владимирович – инженер отдела Центра коллективного пользования «Микросистемная техника и элементно-компонентная база» МИЭТ. *Область научных интересов:* разработка технологических процессов изготовления фотошаблонов для сложных интегральных схем.

Аваков Сергей Мирзоевич – доктор технических наук, директор Научно-производственного республиканского унитарного предприятия «КБТЕМ-ОМО» (г. Минск, Беларусь). *Область научных интересов:* методы, модели, алгоритмы автоматического контроля топологии субмикронных планарных структур в производстве изделий микроэлектроники.

Анализ надежности функционирования цифровых КМОП СБИС с учетом эффектов деградации транзисторов

С.В.Гаврилов, О.Н.Гудкова, Э.Р.Каграманян

Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН

Рассмотрены проблемы анализа надежности цифровых КМОП СБИС, возникающие при переходе на производство СБИС с нанометровыми проектными нормами. Проанализированы методы моделирования одного из основных эффектов деградации параметров ИС – температурной нестабильности при отрицательном смещении (NBTI-эффект). Предложена модель деградации порогового напряжения p -МОП-транзистора с учетом влияния NBTI-эффекта, а также алгоритм распространения вероятности сигнала по схеме для повышения точности при оценке деградации. На основе полученной модели проведена оценка изменения временных параметров стандартных цифровых элементов. Разработан маршрут статического временного анализа с учетом чувствительностей временных параметров к указанным изменениям пороговых напряжений транзисторов.

В течение последних десяти лет темпы развития производства ИС стали опережать прогнозы, выразившиеся в законе Мура [1, 2]. Несмотря на пессимистичные прогнозы конца 90-х гг. прошлого века [3], согласно которым дальнейшее масштабирование КМОП-технологии станет невозможным при достижении размерами транзисторов предельного значения в 100 нм, ведущие фабрики-производители СБИС и УБИС уже сегодня активно осваивают технологические процессы с размерами транзисторов 45 и 32 нм. Более того, согласно оценкам экспертов ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors) в ближайшие несколько лет наладится массовое производство кристаллов ИС с проектной нормой 22 нм [4].

Процесс масштабирования КМОП-технологии не может продолжаться бесконечно. Следовательно, после достижения определенного предела дальнейшие темпы развития технологии не смогут более удовлетворять «требованиям» закона Мура. По некоторым оценкам [5, 6], этот предел будет достигнут раньше, чем размеры транзисторов станут сопоставимы с размерами атомов. Причиной этому послужит не технологическая невозможность дальнейшего масштабирования, а экономическая нецелесообразность производства, так как при приближении к нанометровому диапазону резко возрастают производственные затраты. Например, стоимость устройства для проведения процесса литографии за последние десять лет увеличилась примерно в 10 раз и приближается к сумме в 100 млн долл. США [2].

Параллельно с проблемой технологической реализации проектов нанометровых УБИС в последние годы усугубилась проблема обеспечения приемлемого параметрического выхода годных ИС [7]. Причина этого заключается в следующем: при переходе на глубоко субмикронные и нанометровые технологии такие факторы, как вариации технологических и внешних параметров, а также эффекты деградации, оказывают все более существенное влияние на работоспособность ИС. Причем если технологические вариации непосредственно ухудшают параметрический выход годных схем при произ-

водстве, то внешние вариации и эффекты старения могут существенно влиять на характеристики схемы уже в процессе ее срока службы. К основным эффектам старения ИС можно отнести электромиграцию (ElectroMigration – EM), инжекцию горячих носителей (Hot Carrier Injection – HCI), температурную нестабильность при отрицательном смещении (Negative Bias Temperature Instability – NBTI), пробой диэлектрика в зависимости от времени (Time-Dependent Dielectric Breakdown – TDDDB), эффекты одиночных сбоев (Single Event Effects – SEE) и т.д. Для того чтобы по возможности точно спрогнозировать реальную работоспособность будущего кристалла ИС и тем самым иметь возможность повысить процент выхода годных, необходимо еще на ранних стадиях проектирования учитывать влияние всех известных эффектов старения на характеристики схемы.

Задача создания моделей и алгоритмов учета эффектов деградации всецело возлагается на разработчиков современных САПР СБИС. Непрерывное развитие таких моделей и алгоритмов периодически отражается в новых версиях соответствующих программ моделирования таких лидеров производства промышленных САПР СБИС, как Synopsys, Cadence, Mentor Graphics и некоторых других компаний.

Учитывая природу возникновения перечисленных эффектов старения ИС и процентные доли, вносимые отдельными эффектами в общую деградацию, можно сделать вывод, что для современных СБИС и УБИС основными факторами старения становятся эффекты HCI и NBTI, причем последний все чаще рассматривается как доминирующий [8, 9]. Несмотря на то что исследование NBTI-эффекта проводилось еще на ранних стадиях развития микроэлектроники [10], его влияние стало существенно проявляться только при переходе на современные нанометровые технологии производства [11].

В ряде статей последних лет [7, 11, 12] приводится описание механизма возникновения NBTI-эффекта. В основе NBTI-эффекта лежит генерация поверхностных состояний (ловушек) под затвором p -МОП-транзистора на границе перехода кремний/оксид (Si/SiO_2) вследствие распада Si-H -связей под воздействием отрицательного смещения ($V_{gs} = -V_{dd}$) при высоких рабочих температурах. NBTI-эффект выражается в деградации таких параметров транзистора, как пороговое напряжение V_{th} , крутизна передаточной характеристики g_m , ток в режиме насыщения I_{dsat} , ток в закрытом режиме I_{off} и т.д. На уровне логических элементов эти изменения приводят к росту задержки D распространения сигнала. На системном уровне NBTI-эффект, как правило, ухудшает такие параметры, как джиттер, рабочая частота, скважность сигнала и т.д. [13]. NBTI-эффект также сказывается на работоспособности элементов памяти [14–16] и смешанных аналого-цифровых схем [13], в которых ухудшаются соответственно такие параметры, как, например, помехоустойчивость при записи/чтении, время установки и удержания, полоса пропускания и т.д. Таким образом, влияние NBTI-эффекта на работоспособность ИС необходимо учитывать на разных уровнях и стадиях моделирования проекта.

За последнее десятилетие проблемы деградации КМОП-схем при воздействии NBTI-эффекта были подробно рассмотрены в работах, представленных на международных конференциях, таких как ICCAD, DAC, DATE, ISQED, ITC и др. Однако большинство этих работ касается вопросов построения моделей деградации порогового напряжения и их использования для моделирования схем только на электрическом уровне.

Данная статья является одной из первых работ, посвященных исследованию влияния NBTI-эффекта на характеристики цифровых КМОП-схем на логическом уровне. В работе предложена модель деградации порогового напряжения вследствие влияния NBTI-эффекта, в которой также учитывается влияние деградации за время длительности фронтов переключения.

Учет влияния NBTI-эффекта в процессе проектирования ИС. Для учета влияния NBTI-эффекта на разных стадиях проектирования ИС необходимы соответствующие модели изменения ключевых параметров транзисторов вследствие данного эффекта. Следовательно, стадией, предшествующей непосредственно моделированию, является построение так называемой модели «старения» транзисторов. Старение p -МОП-транзистора под влиянием NBTI-эффекта главным образом проявляется в росте его порогового напряжения.

Так как NBTI-эффект существенно проявляется, как правило, лишь по прошествии довольно длительного периода работы схемы (начиная от срока в несколько лет) для построения модели тестовые схемы проверяют на работоспособность при определенных условиях (температуре, напряжении питания, входном наборе сигналов и т.д.), приводящих к ускоренному старению. Схема в этих условиях подвергается стрессу в течение нескольких десятков часов, после чего измеряется изменение ее характеристик и с помощью методов экстраполяции полученных данных делается оценка ее реальной деградации в обычном рабочем режиме в течение более длительных сроков службы.

Влияя в основном на p -МОП-транзисторы, NBTI-эффект, как правило, приводит к изменению их порогового напряжения V_{th} примерно на 50 мВ за 10-летний срок службы, т.е. на 25–30%. В целом на долю NBTI-эффекта приходится около 20% ухудшения быстродействия и в худших случаях – функциональных сбоев в работе схемы [9, 17].

Отметим, что p -МОП-транзистор подвержен NBTI-эффекту, когда на его затвор подано отрицательное смещение относительно истока. Такая полярность напряжений соответствует логическому нулю на затворе. Очевидно, что чем дольше транзистор будет находиться в указанных условиях, которые с точки зрения NBTI называются режимом стресса, тем больше будет деградация его порогового напряжения, т.е. размер NBTI-деградации p -МОП-транзистора зависит от времени, в течение которого он находится в режиме стресса, и, следовательно, от вероятности сигнала.

Так как современные цифровые схемы состоят из миллионов узлов с разными вероятностями сигнала и коэффициентами активности, разные пути распространения сигнала оказываются подверженными деградации в разной степени. При этом генерация поверхностных ловушек, следовательно, и изменение порогового напряжения не зависят от коэффициента активности сигнала, а зависят только от вероятности сигнала (нуля) [17].

Согласно [9, 11, 15, 18] изменение порогового напряжения за счет NBTI-эффекта имеет степенную зависимость от вероятности нуля:

$$\Delta V_{th} = K p^n t^n,$$

где K – коэффициент, зависящий от технологии; p – вероятность сигнала (нуля); t – время работы схемы; n – константа, зависящая от технологии ($\sim 0,15\text{--}0,3$).

Исходя из того, что задержка пропорциональна V_{th} , в работе [18] предлагается использовать следующую модель задержки вентиля для учета NBTI-эффекта:

$$t_p = a_0 + a_1 p^n t^n,$$

где p – вероятность нуля для переключающегося входа; a_0 – задержка вентиля без деградации; a_1 – константа.

Деградация задержки рассчитывается только для критических путей. Вероятность сигнала распространяется следующим образом: если вероятность нуля на входе первого вентиля p , то на входе второго – $(1 - p)$ и т.д. (рис.1). Однако вероятности сигналов

на остальных входах вентилей критического пути выбираются не исходя из логики работы схемы, а так, чтобы переключение от первичного входа критического пути распространилось до выхода. Этот факт является существенным недостатком данного подхода. Можно сделать вывод, что статический временной анализ с учетом NBTI-эффекта может быть значительно уточнен, если предварительно вычислять реальные вероятности нуля во всех узлах схемы. Это существенно повысит точность оценки деградации задержки с учетом NBTI.

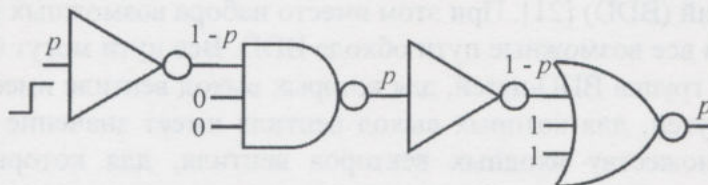


Рис.1. Пример распространения вероятности сигнала через комбинационную схему

Анализ вероятностей сигналов на уровне схемы. В настоящей статье в отличие от работы [18] предлагается метод распространения вероятности сигнала p по схеме с учетом вероятностей на всех первичных входах. Кроме того, для описания корреляции двух сигналов по аналогии с работами [19, 20] вводятся так называемые коэффициенты корреляции SC . Например, для пары сигналов a и b вводится четверка коэффициентов:

$$SC_{ij}^{ab} = \frac{p(a = i \& b = j)}{p(a = i)p(b = j)},$$

где $i, j = 0, 1$.

Для упрощения задачи учета корреляций можно предположить, что существенное влияние оказывают только парные корреляции. Иными словами, можно пренебречь корреляцией любой пары сигналов к третьему. В этом случае вероятность сложного события может быть приближенно вычислена с помощью следующей формулы:

$$p\left(\prod_{k=1}^n (a_k = i_k)\right) = \prod_{k=1}^n p(a_k = i_k) \prod_{1 \leq k < l \leq n} SC_{i_k i_l}^{a_k a_l}.$$

Так как $p(a = i \& b = j) = p(a = i | b = j)p(b = j) = p(b = j | a = i)p(a = i)$, имеем:

$$SC_{ij}^{ab} = \frac{p(a = i | b = j)}{p(a = i)} = \frac{p(b = j | a = i)}{p(b = i)}.$$

Отсюда получаются следующие соотношения для четверки коэффициентов SC^{ab} :

$$\sum_{i=0,1} SC_{ij}^{ab} p(a = i) = 1, \quad j = 0, 1; \quad \sum_{j=0,1} SC_{ij}^{ab} p(b = j) = 1, \quad i = 0, 1.$$

Матрица системы имеет ранг 3 [19]. Следовательно, зная значение SC_{00}^{ab} , можно вычислить и три других коэффициента, используя формулы:

$$SC_{01}^{ab} = \frac{1 - SC_{00}^{ab} p_b}{1 - p_b}, \quad SC_{10}^{ab} = \frac{1 - SC_{00}^{ab} p_a}{1 - p_a}, \quad SC_{11}^{ab} = \frac{1 - SC_{00}^{ab} p_b}{1 - p_b}. \quad (1)$$

Алгоритм распространения парных корреляций в худших случаях имеет сложность $O(N^2)$, где N – число узлов. Однако эксперименты показали, что алгоритм можно свести к упрощенному варианту со сложностью $O(\ln N)$, опуская при этом корреляции для узлов, удаленных друг от друга по уровням.

Для вычисления вероятности сигнала на выходе вентиля необходимо знать вероятности на всех входах вентиля и коэффициенты корреляции для всех пар входов. Для повышения эффективности метода КМОП-вентиль можно представить в виде диаграммы двоичных решений (BDD) [21]. При этом вместо набора возможных входных векторов рассматриваются все возможные пути обхода BDD. Все пути могут быть разделены на две группы: $T0$ – группа BDD-путей, для которых выход вентиля имеет значение «0»; $T1$ – группа BDD-путей, для которых выход вентиля имеет значение «1». BDD-путь соответствует подмножеству входных векторов вентиля, для которых определены только некоторые переменные, при этом остальные входы не влияют на этот путь.

Пусть $K(t)$ – набор пронумерованных входов вентиля, которые заданы для пути t . Формулу вероятности для сложного события, при котором выход вентиля равен 0 ($y = 0$), можно записать следующим образом:

$$p(y = 0) = \sum_{t \in T0} \prod_{k \in K(t)} p((x_k = i_k)) \prod_{l \in K(t), l < k} SC_{i_k i_l}^{x_k x_l},$$

где i_k, i_l – элементы входного вектора.

Вычисления на основе BDD-подхода эффективнее, так как перебор путей в BDD реализуется быстрее, чем перебор всех входных векторов. На рис.2 приведена схема вентиля И-ИЛИ-НЕ. В качестве примера можно рассмотреть все так называемые ложные векторы (т.е. векторы, которые приводят к тому, что верхняя цепь не проводит). Таких входных векторов четыре: (1, 1, 0), (1, 1, 1), (0, 0, 1), (0, 1, 1). В противоположность этому в BDD, представленной на рис.2,б, всего два пути ведут к значению «0» в узле y : ($a = 1, b = 1$), ($c = 1$).

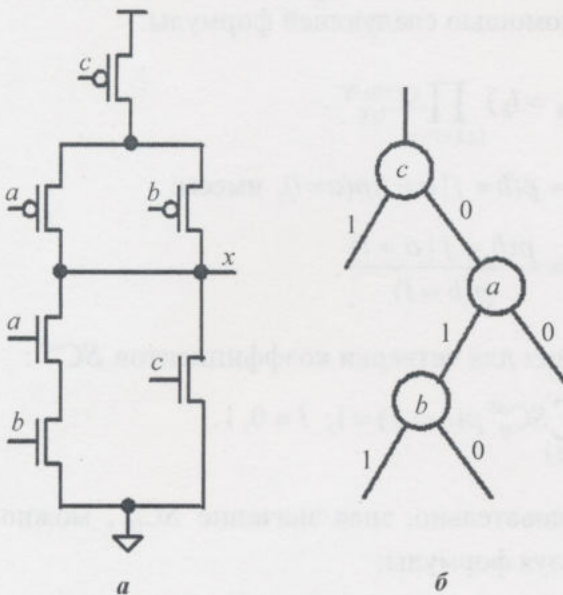


Рис.2. КМОП-элемент И-ИЛИ-НЕ: а – принципиальная схема; б – BDD-представление

Для первого пути неопределяющим является вход c , для второго – входы a и b . Вероятность нуля на выходе вентиля будет:

$$p(y = 0) = p(a = 1)p(b = 1)SC_{11}^{ab} + p(c = 1).$$

Очевидно, что BDD-подход намного быстрее, чем вычисления с использованием векторов. Кроме того, если все три входных сигнала попарно связаны, то формула с использованием входных векторов будет лишь приближенной (без учета корреляций высоких порядков).

Для анализа логических состояний каждого элемента SC -коэффициенты необходимо распространять через схему от первичных входов до первичных выходов.

Для произвольного сигнала z с известными вероятностью и SC -коэффициентами для каждого входа вентиля (см. рис.2) можно распространить SC -коэффициенты сигнала z от входа до выхода вентиля.

В данном случае коэффициент корреляции определяется как

$$SC_{00}^{zy} = \frac{p(z=0 \& y=0)}{p(z=0)p(y=0)}.$$

Рассматривая $(z=0 \& y=0)$ как сложное событие и вычисляя его вероятность, можно получить следующую формулу для распространения SC через вентиль с использованием BDD-путей вместо входных векторов:

$$SC_{00}^{zy} = \frac{(\sum_{t \in T_0} \prod_{k \in K(t)} (p(x_k = i_k) SC_{0i_k}^{zx_k} \prod_{k < l \leq n} SC_{i_k i_l}^{x_k x_l}))}{p(y=0)}.$$

Три остальных SC -коэффициента могут быть вычислены с помощью формул (1).

Логико-временная модель деградации порогового напряжения. Для повышения точности логико-временного анализа с учетом эффектов деградации предлагается следующая методика. Задержка вентиля с учетом деградации может быть представлена как $D = D_0 + \Delta D$, где D_0 – задержка вентиля без деградации; ΔD – изменение задержки вследствие NBTI-эффекта. Деградация задержки в предлагаемом подходе, так же как и в [18], определяется как линейная функция изменения порогового напряжения: $\Delta D = f(\Delta V_{th})$. Для более полной оценки сдвига порогового напряжения за счет NBTI-эффекта деградации предлагается модель, учитывающая влияние NBTI-эффекта также и на фронтах.

Для учета влияния емкостей и фронтов воспользуемся формулой деградации порогового напряжения: $\Delta V_{th} = K(\text{Damage})^n$, где Damage – степень деградации порогового напряжения; n – параметр, зависящий от технологии. Проводить такой анализ для каждого вентиля библиотеки нецелесообразно из-за больших объемов вычислений. В реальности деградация зависит от формы входного сигнала. Различные входные сигналы могут определяться разными фронтами, поданными на затвор p -МОП-транзистора, а также вероятностями нуля на затворе. Таким образом, для всего времени жизни Damage вычисляется следующим образом:

$$\text{Damage} = \int_{V_{gs} \geq V_{ds}} K_1 (\text{abs}(V_{gs}(t)))^m dt,$$

где $V_{gs}(t)$ – напряжение затвор–исток; $V_{ds}(t)$ – напряжение сток–исток; K_1 , m – коэффициенты, зависящие от технологии.

Существует два различных участка NBTI-стресса (рис.3,а): когда p -МОП-транзистор управляется постоянным входным напряжением V_{gs}^0 и когда выполняется условие $V_{gs} \geq V_{ds}$ (переключение на выходе). Для определения интервалов деградации вычисляются длительности фронтов t_{rise} и t_{fall} . Для точного расчета деградации V_{th} важно учитывать обе составляющие. Приведем расчет этих параметров для переключения 1→0 на затворе p -МОП-транзистора (рис.3,б):

$$t_1 = \frac{S_{inp}^r}{2} + delay^f - \frac{S_{out}^f}{2}; t_2 = \frac{S_{inp}^r}{2}; t_3 = \frac{S_{out}^f}{2}; x = \frac{S_{inp}^r}{S_{out}^f}; x + z = \frac{S_{inp}^r}{2} + \frac{S_{out}^f}{2} - delay^f;$$

$$x = \frac{S_{inp}^r}{2} \cdot \frac{(S_{inp}^r + 2delay^f + S_{out}^f)}{(S_{inp}^r + S_{out}^f)}; z = \frac{S_{out}^f}{2} \cdot \frac{(S_{inp}^r + 2delay^f + S_{out}^f)}{(S_{inp}^r + S_{out}^f)};$$

$$t_{fall} = \frac{S_{inp}^r}{2} + delay^f - \frac{S_{out}^f}{2} + \frac{S_{out}^r}{2} \cdot \frac{(S_{inp}^r + 2delay^f + S_{out}^f)}{(S_{inp}^r + S_{out}^f)}.$$

Здесь S_{inp}^r – длительность полного входного фронта (переключение r_f); S_{out}^f – длительность полного выходного фронта (переключение r_f); $delay^f$ – задержка переключения (измеренная на уровне $0,5 \cdot vdd$).

Аналогично рассчитывается t_{rise} для входного переключения $1 \rightarrow 0$:

$$t_{rise} = \frac{S_{out}^r}{2} \cdot \frac{S_{inp}^f + S_{out}^r + 2delay^r}{S_{inp}^f + S_{out}^r}.$$

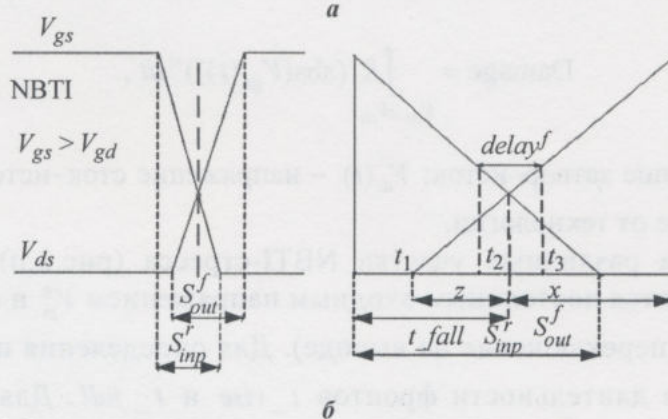
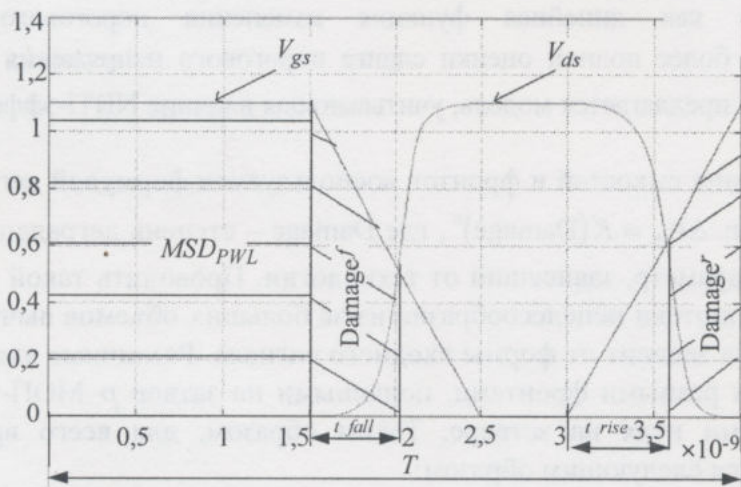


Рис.3. Входной и выходной сигналы инвертора и области влияния эффектов деградации: а – результаты электрического моделирования; б – линеаризация фронтов

Таким образом, определяются три части для расчета Damage за период сигнала:

$$\text{Damage}_{PWL} = \text{MSD}_{PWL} + (\text{Damage}^f + \text{Damage}^r),$$

где составляющая MSD_{PWL} оказывает наибольшее влияние на деградацию порогового напряжения и действует во время подачи отпирающего сигнала на затвор p -МОП-транзистора, а $\text{Damage}^f, \text{Damage}^r$ – во время среза и фронта соответственно. За все время жизни $\text{Damage} = \text{Damage}_{PWL} \tau \varphi = \text{MSD} + (\text{Damage}^f + \text{Damage}^r) \tau \varphi$, где φ – частота переключения в узле. Для расчета MSD для устойчивого состояния на входе ($V_{gs}(t) = V_{gs}^0$): $\text{MSD} = K_1 (\text{abs}(V_{gs}^0))^m \tau p$, где p – вероятность логического нуля; τ – полное время жизни.

Используя уравнение для напряжения на промежутке t_{fall} , можно рассчитать компонент Damage^f :

$$\text{Damage}^f = K_1 \frac{\left(\left(\text{abs} \left(V_{gs}^0 - t_{fall} \cdot \frac{V_{gs}^0}{S_{inp}^r} \right) \right)^{m+1} - (\text{abs}(V_{gs}^0))^{m+1} \right)}{(m+1) \left(-\frac{V_{gs}^0}{S_{inp}^r} \right)}.$$

Подобные выражения можно получить для Damage^r .

Используя значение частоты в узлах, можно оценить деградацию порогового напряжения V_{th} :

$$\Delta V_{th} = K \left(\text{MSD} + (\text{Damage}^f + \text{Damage}^r) \frac{\tau}{T} \right)^n,$$

где T – время моделирования в SPICE.

Экспериментальные результаты анализа надежности на логическом уровне. Точность предложенной модели была проверена экспериментально. На рис.4 представлены относительные погрешности расчета деградации порогового напряжения (для вероятностей логического нуля $p = 0,75; 0,5; 0,25$) с помощью аналитической модели по сравнению с электрическим моделированием. Ошибка предложенной модели влияния NBTI-эффекта на изменение порогового напряжения, учитывающая деградацию на фронтах, представлена кривыми 1', 2', 3'. Как показывает эксперимент, учет влияния NBTI-эффекта на фронтах позволяет снизить относительную ошибку вычислений до 0,05%.

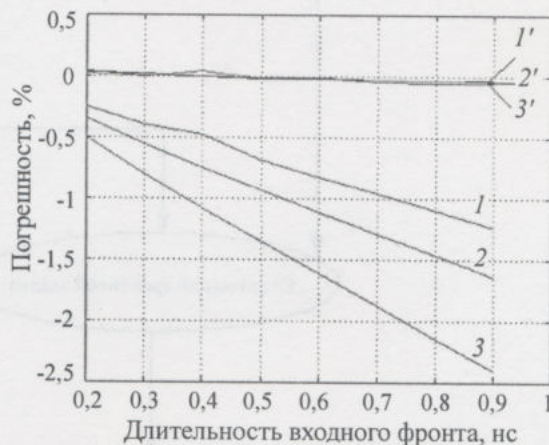


Рис.4. Относительные погрешности методов учета деградации на вентильном уровне при вероятностях логического нуля соответственно 0,75; 0,5; 0,25: 1, 2, 3 – без учета деградации на фронтах; 1', 2', 3' – с учетом

На рис.5 представлен предлагаемый маршрут статического временного анализа (СВА) с учетом деградации порогового напряжения. На первом этапе из описания схемы на транзисторном уровне находятся коэффициенты K и K_1 для следующих формул:

$$\Delta V_{th} = K(\text{Damage})^n; \text{Damage} = \int_{V_{gs} \geq V_{ds}} K_1 (\text{abs}(V_{gs}(t)))^m dt.$$

Данные коэффициенты зависят не только от технологии – они рассчитываются для конкретных заданных значений температуры и напряжения питания, для которых будет характеризоваться библиотека. Параметры n и m определены для данной технологии. Для определения коэффициента K_1 проводится моделирование инвертора при отрицательном смещении затвора p -МОП-транзистора без переключений. При этом интеграл для расчета Damage можно заменить произведением: $\text{Damage} = K_1 (V_{gs}^0)^m t$. Из получен-

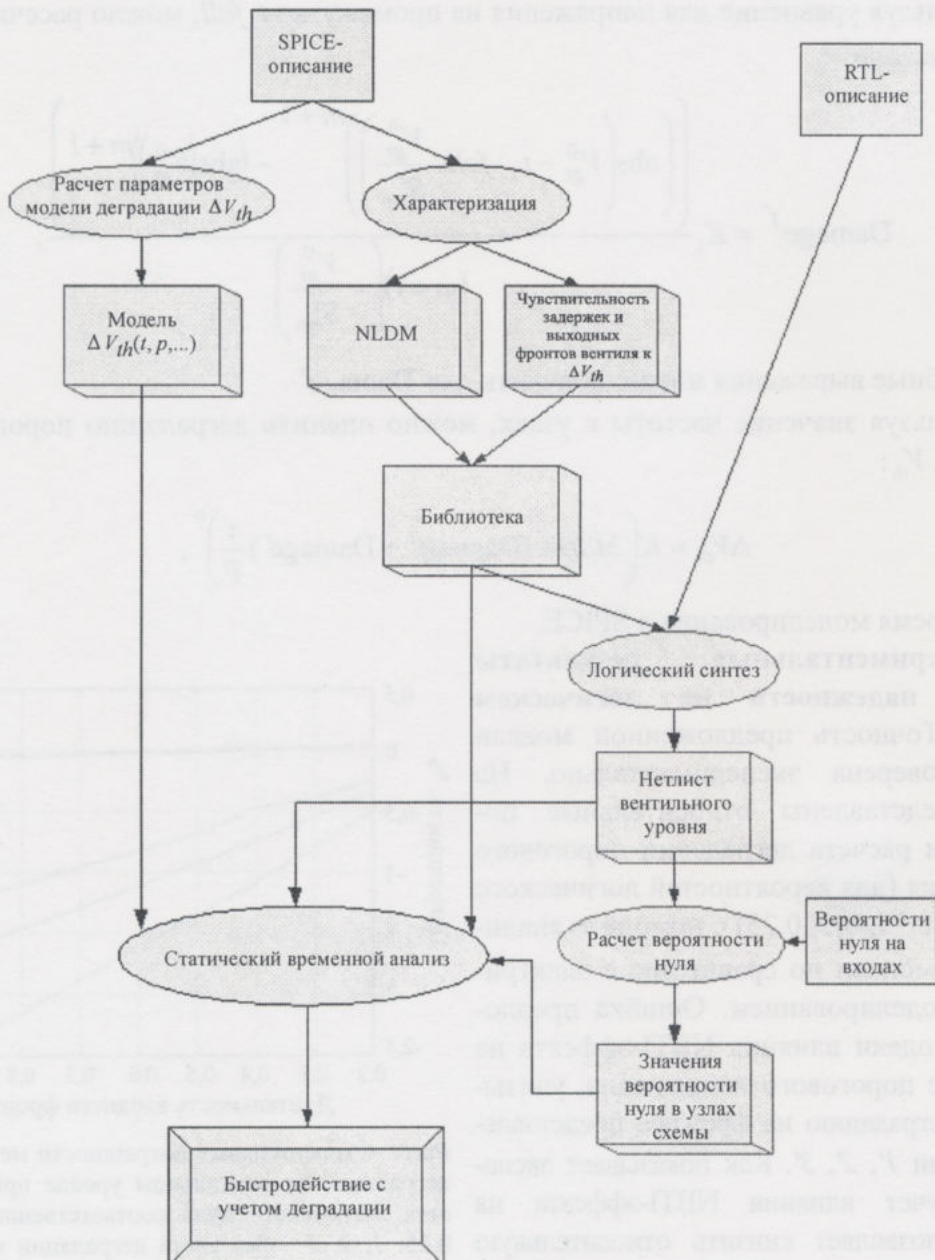


Рис.5. Маршрут статического временного анализа с учетом эффектов деградации

ного выражения, учитывая, что для инвертора напряжение V_{gs} с точностью до 0,05% равно напряжению питания, можно найти коэффициент K_1 , а коэффициент K определяет пропорциональность между Damage и ΔV_{th} .

Параллельно с процессом расчета коэффициентов проводится характеристика библиотеки стандартных ячеек. Характеристика заключается в электрическом моделировании вентиля и построении модели его временных параметров. В данном случае библиотека будет отличаться от обычной NLDM-библиотеки, так как кроме зависимостей задержки и выходного фронта от входного фронта и нагрузочной емкости она будет включать в себя коэффициенты чувствительности задержки и выходного фронта к изменению порогового напряжения.

Предложенные методики реализованы в составе программного комплекса для статического временного анализа. Проведена оценка деградации задержек вентиля с использованием предложенного метода расчета вероятностей нуля и сравнительный анализ предлагаемого подхода с результатами метода, предложенного в работе [18]. Метод, описанный в [18], не гарантирует оценки сверху изменения задержки в результате влияния эффектов деградации и может приводить как к завышенным, так и к заниженным оценкам. Результаты статического временного анализа для тестовых схем с использованием предложенной аппроксимации и сравнение с другими методами представлены в таблице (технология 65 нм, напряжение питания 1,1 В, температура 105 °С). Оценка деградации задержки проводилась для времени жизни 10 лет.

Результаты статического временного анализа

Схема	Задержка критического пути через 10 лет, пс			
	Расчет без деградации	Существующий метод [18]	Предлагаемый метод	Максимальная деградация
1	2	3	4	5
<i>Inv20</i>	292,62	304,37 (4,0%)	304,37 (4,0%)	306,60 (4,8%)
<i>C499</i>	708,34	743,85 (5,0%)	737,28 (4,1%)	750,65 (6,0%)
<i>C432</i>	843,05	873,18 (3,6%)	872,23 (3,5%)	879,12 (4,3%)
<i>C6288</i>	2600,46	2711,69 (4,3%)	2705,874 (4,1%)	2734,182 (5,1%)
<i>7418b</i>	441,27	462,06 (4,7%)	461,316 (4,5%)	466,007 (5,6%)
<i>74L8b</i>	219,47	226,43 (3,2%)	226,186 (3,1%)	228,951 (4,3%)
<i>74182</i>	177,23	182,10 (2,7%)	181,987 (2,7%)	183,019 (3,3%)

В таблице колонка 2 содержит задержки критического пути без учета деградации, в колонке 3 представлены результаты для метода, описанного в работе [18], а в колонке 4 представлены результаты для метода, основанного на расчете вероятностей сигналов с учетом корреляций, колонка 5 содержит результаты для случая, когда все транзисторы находятся в стрессовом состоянии все время работы схемы. Как видно из таблицы, предложенный подход позволяет существенно уменьшить пессимизм при оценке деградации.

Предложенный метод анализа надежности функционирования цифровых СБИС на логическом уровне обеспечивает оценку деградации задержек во времени за счет анализа логических состояний узлов и транзисторов. Для быстрого анализа логических состояний узлов и транзисторов предложен вероятностный подход, обеспечивающий расчет времени нахождения транзисторов в стрессовом состоянии за счет распространения вероятностей сигналов с учетом их корреляций. Использование предлагаемой модели и учет логических состояний приводит к более точным оценкам деградации задержек во времени по сравнению с известными подходами.

Литература

1. **Moore G.E.** Cramming more components onto integrated circuits // Proc. of the IEEE. – 1998. – Vol. 86, N 1. – P. 82–85.
2. **Moore G.E.** No exponential is forever: But «forever» can be delayed! // Digest of Technical Papers of IEEE International Solid-State Circuits Conference. – 2003. – P. 20–23.
3. **Nowak E.J.** Maintaining the benefits of CMOS scaling when scaling bogs down // IBM Journal of Res. & Dev. – 2002. – Vol. 46, N 2–3. – P. 169–180.
4. International Technology Roadmap for Semiconductors. – Режим доступа: www.public.itrs.net.
5. **Schaller R.R.** Moore's law: past, present and future // Spectrum, IEEE. – 1997. – Vol. 34. – P. 52–59.
6. **Hutcheson G.D., Hutcheson J.D.** Technology and economics in the semiconductor industry // Scientific American. – 1996. – P. 54–62.
7. **Schroder D.K., Babcock J.A.** Negative bias temperature instability: road to cross in deep submicron silicon semiconductor manufacturing // J. of Appl. Phys. – 2003. – Vol. 94. – N 1.
8. Impact of negative bias temperature instability on product parametric drift / **V.Reddy et al.** // Proc. of ITC. – 2004. – P. 148–155.
9. The impact of NBTI on the performance of combinational and sequential circuits / **W.Wang et al.** // Proc. of DAC. – 2007. – P. 364–369.
10. **Goetzberger A., Nigh H.E.** Surface charge after annealing of Al-SiO₂-Si structures under bias // Proc. of the IEEE. – 1966. – Vol. 54. – P. 1454–1454.
11. **Schroder D.K.** Negative bias temperature instability: What do we understand? // Microelectronics Reliability. – 2007. – Vol. 47. – P. 841–852.
12. **Kufluoglu H., Alam M.A.** A generalized reaction-diffusion model with explicit H-H₂ dynamics for negative-bias temperature-instability (NBTI) degradation // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2007. – Vol. 54, N 5. – P. 1101–1107.
13. A new simulation method for NBTI analysis in SPICE environment / **R.Vattikonda et al.** // Proc. of ISQED. – 2007. – P. 41–46.
14. Impact of NBTI on SRAM read stability and design for reliability / **S.V.Kumar et al.** // Proc. of ISQED. – 2006. – P. 210–218.
15. Impact of negative-bias temperature instability in nanoscale SRAM array: modeling and analysis / **K.Kang et al.** // IEEE Transactions on CAD of integrated circuits and systems. – 2007. – Vol. 26. – P. 1770–1781.
16. NBTI-aware flip-flop characterization and design / **H.Abrishami et al.** // Proc. of ACM great lakes symposium on VLSI. – 2008. – P. 29–34.
17. An analytical model for negative bias temperature instability / **S.V.Kumar et al.** // Proc. of the IEEE/ACM international conference on CAD. – 2006. – P. 493–496.
18. **Wang W., Wei Z., Yang S., Cao Y.** An efficient method to identify critical gates under circuit aging // Proc. of the IEEE international conference on CAD. – 2007. – P. 735–740.
19. **Marculescu R., Marculescu D., Pedram M.** Switching activity analysis considering spatiotemporal correlations // Proc. of the ICCAD. – 1994. – P. 294–299.
20. Testability measures in pseudorandom testing / **S.Ercolany, M.Favalli, M.Damiani et al.** // IEEE Trans. On CAD. – 1992. – Vol. 11. – P. 794–800.
21. **Bryant R.E.** Graph-based algorithms for boolean function manipulation // IEEE Transactions on Computers. – 1986. – P. 677–691.
22. **Liu Z., McGaughy B. W., Ma J. Z.** Design tools for reliability analysis // Proc. of DAC. – 2006. – P. 182–187.

Статья поступила

1 июля 2008 г.

Гаврилов Сергей Витальевич – доктор технических наук, заведующий сектором ИППМ РАН. *Область научных интересов:* методы оптимизации СБИС, методы быстрого электрического моделирования, логико-временной анализ схем, анализ помехоустойчивости.

Гудкова Ольга Николаевна – инженер-исследователь ИППМ РАН. *Область научных интересов:* методы логико-временного анализа и анализа надежности ИС, методы проектирования библиотек стандартных цифровых элементов.

Каграманян Эмиль Рудольфович – аспирант кафедры проектирования и конструирования интегральных микросхем МИЭТ, лауреат премии Президента Армении в области информационных технологий. *Область научных интересов:* методы проектирования аналоговых и цифровых СБИС, анализ аналого-цифровых сложно-функциональных блоков.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.932.1

Эвристические и квазитопологические алгоритмы контурной сегментации изображений

В.Д.Колдаев

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

Рассмотрен эмпирический алгоритм решения задачи сегментации применительно к системам технического зрения. Проведен анализ эвристических и квазитопологических алгоритмов контурной сегментации и указаны предпочтительные области их применения. Предложена иерархическая организация данных для анализа и обработки изображений.

Процесс распознавания изображений является сложной многоэтапной процедурой, иерархичность которой обусловлена тем, что различные задачи обработки тесно связаны и качество решения одной из них влияет на выбор метода решения остальных. Подход к распознаванию изображений, основанный на сегментации областей однородной яркости и построении структурного описания, использующего геометрические признаки областей, выполняет следующие функции: построение модели изображения, сегментацию изображения и построение графа описания, связывание элементов контуров изображения, нахождение опорных ориентиров на изображении [1, 2].

В последнее время при обработке изображений используются алгоритмы, которые можно считать моделями процессов преобразования информации (или эвристическими информационными моделями), поскольку они обычно создаются в результате формализации интуитивных представлений о характере связей между начальными и финальными (входными и выходными) данными в конкретных задачах. При обработке изображений имеется значительное число эвристических конструкций, которые с большим или меньшим успехом применяются на практике. Таковыми конструкциями являются типовые процедуры выделения контуров, сегментации, сглаживания, повышения контрастности. Классификационные процедуры иерархического типа используются для получения наглядного представления о стратификационной структуре всей исследуемой совокупности объектов. Эти процедуры основаны на последовательном объединении кластеров (агломеративные процедуры) и их разбиении (дивизимные процедуры). Первоначально все объекты считаются отдельными кластерами, затем на каждом последующем шаге два ближайших кластера объединяются в один. Каждое объединение уменьшает число кластеров на один таким образом, что все объекты объединяются в один кластер. В ходе выполнения последовательных процедур формируется дендрограмма, отображающая результаты группирования объектов на всех шагах эвристического алгоритма [1, 3].

В системах обработки изображений широко распространена растровая модель данных, которая соответствует двумерному ячеечному изображению, хранящемуся в памяти компьютера в виде одномерной последовательности значений.

При обычном порядке сканирования растровых изображений в конце каждой строки происходит скачок на начало следующей строки (рис.1,а). При сканировании методом Boustrophedon нечетные строки кодируются слева направо, а четные – в обратном направлении (рис.1,б). В указанных способах сканирования учитывается автокорреляция значений ячеек только по одному направлению (по строке) [3, 4].

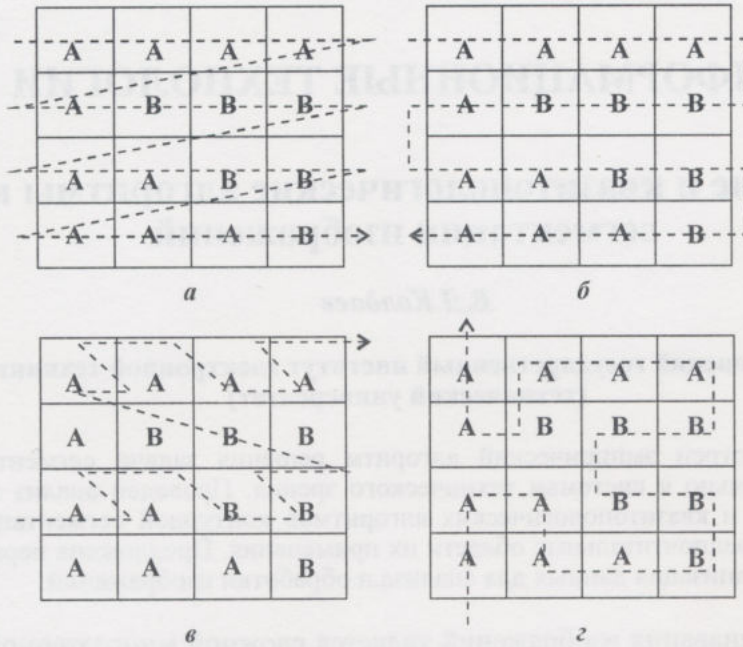


Рис.1. Способы сканирования растров: обычный порядок (а), по методу Boustrophedon (б), Мортон (с), Пеано (д)

Порядок сканирования методом Мортон основан на иерархическом разбиении растрового изображения. При этом предпринимается попытка сканирования ячеек таким образом, чтобы охватить линией обхода двумерные пятна (рис.1,с). При сканировании растра по Мортону линия сканирования представляет собой фрактал.

На рис.1,д ячейки растра сканируются методом Пеано по линиям, которые имеют базовый П-образный шаблон, поворачивающийся от уровня к уровню так, чтобы обеспечить непрерывность линии сканирования.

Рассмотренные выше порядки сканирования растровых изображений дают незначительные различия в компрессии данных.

Для получения адаптивного разрешения растрового изображения, в котором участки с меньшей плотностью информации представлены крупными блоками ячеек, а с

большой плотностью – мелкими блоками ячеек, осуществляется индексация растра. При этом исходная матрица делится на четыре подматрицы размером 8×8 и нумеруется в порядке Мортон как 0, 1, 2, 3. Подматрица считается гомогенной, если в ней содержатся одинаковые значения. Негомогенные подматрицы рекурсивно разбиваются до тех пор, пока не достигнута гомогенность всех подматриц (рис.2). Представленные таким способом растровые данные соответствуют квадродереву, вершина которого – исходное изображение, а листья – гомогенные блоки ячеек. При кодировании квадродеревьев ячейки на каждом уровне могут содержать либо значение гомогенного блока, либо указатель на следующий уровень [4, 5].

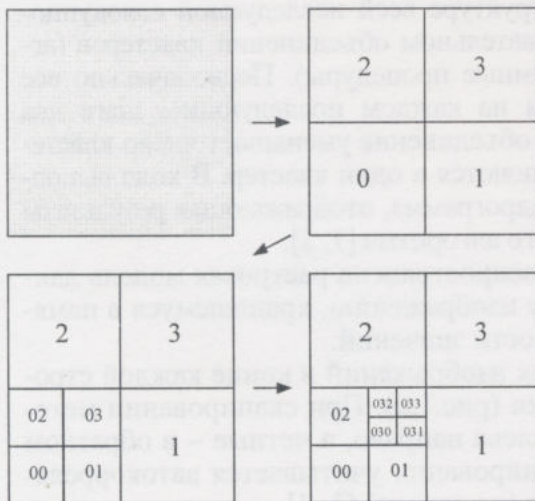


Рис.2. Разбиение растра на гомогенные блоки

Основное преимущество иерархической организации данных заключается в пространственном упорядочении информации и более быстром ее поиске, а также позволять получать быстрые способы доступа к пространственным данным.

Индексирование пространственных объектов позволяет уменьшить вычислительную сложность процедур поиска пересекающихся и вложенных объектов и используется для поиска объектов, пересекающих заданный полигон или линию. Для этого определяется минимальный лист квадродерева, включающий заданный объект. Поднявшись из полученного узла до вершины дерева и выполнив обход поддерева, корнем которого является этот узел, получим список листьев дерева, внутри которых объекты могут пересекаться с заданным объектом.

Среди алгоритмов контурной сегментации особое место занимают квазитопологические алгоритмы обработки изображений, основанные на представлении сегментов изображения в виде графа и поиске на графе пути наименьшей стоимости, который соответствует значимым контурам. Для структурного описания изображения, инвариантного относительно операций переноса и поворота, используется граф с помеченными вершинами и ребрами. Процедура распознавания состоит в установлении изоморфизма графов описания исходного и заданного эталонного изображения.

На основе графового определения задачи сегментации строится модель, использующая методы кластерного анализа. В этом случае вес вершины определяет размер блока (сегмента), а вес ребра – число связей между блоками. Задача состоит в разбиении вершин на множества таким образом, чтобы суммарный вес вершин, попавших в одно множество, не превосходил веса множества, а суммарный вес ребер между разбитыми множествами вершин был минимален.

Рассмотрим эмпирический алгоритм решения задачи сегментации, использующий принцип оптимальности Беллмана. Пусть задано m блоков: l_1, l_2, \dots, l_m . Площадь изображения разбивается на n сегментов. Допустим, что число блоков больше числа сегментов ($m \geq n$), причем $l_1 + l_2 + \dots + l_m \geq s_1 + s_2 + \dots + s_n$, где s_i – i -й сегмент. Рассмотрим случай, когда $s_1 + s_2 + \dots + s_n = ns$; $\forall i, s_i = s, i = 1, 2, \dots, n$. Обозначим матрицу связей между блоками через $R = [r_{ij}]$, где r_{ij} – число передач между блоками b_i и b_j . Очевидно, матрица R – симметричная матрица, т.е. $r_{ij} = r_{ji}$, так как суммарное число передач имеет свойство ассоциативности. Необходимо разбить блоки по сегментам таким образом, чтобы суммарное число передач между сегментами было минимально. Сегменты обладают свойством $s_i \cap s_j = 0, i \neq j$. Выполнение заданного свойства гарантирует тот факт, что при разбиении блоков по сегментам каждый блок может принадлежать только одному сегменту. Алгоритм является последовательным и выполняет шаги до тех пор, пока все блоки не будут разбиты по сегментам [4, 6].

На первом шаге выбирается произвольный блок b_1 и записывается в произвольно выбранный сегмент $b_1 \in s_1$. Определяется блок, с которым определенный в сегмент s_1 блок b_1 имеет максимальное число передач. Далее алгоритм проверяет может ли найденный блок быть определен в сегмент s_1 , т.е. вычисляет сумму $l_1 + l_{new} \geq s_1$. Если ус-

ловие выполняется, то блок $b_{new} \in s_1$, в противном случае, блок b_{new} присваивают следующему сегменту. Блок обладает n признаками $b_i(r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, \dots, r_{in})$ при $r_{ij} = 0, i = j$. На каждой итерации при рассмотрении нового блока этот блок присваивается тому сегменту, который на данном шаге имеет наиболее оптимальную характеристику с точки зрения цели задачи, а сегмент наследует признаки. Алгоритм продолжает свою работу до тех пор, пока не будут рассмотрены все блоки.

Применение графовых моделей для обработки изображений в реальном времени упрощает решение прикладных задач благодаря возможности макетирования высокоуровневого алгоритма обработки зрительных данных. Проблема индексации объектов решается с использованием R -деревьев (R -rectangle), которая базируется на концепции минимального вмещающего прямоугольника. При этом требуется найти два таких прямоугольника, чтобы внутри них было расположено максимально возможное число объектов. При этом нужно стремиться, чтобы количество объектов в прямоугольниках было приблизительно одинаковым (рис.3).

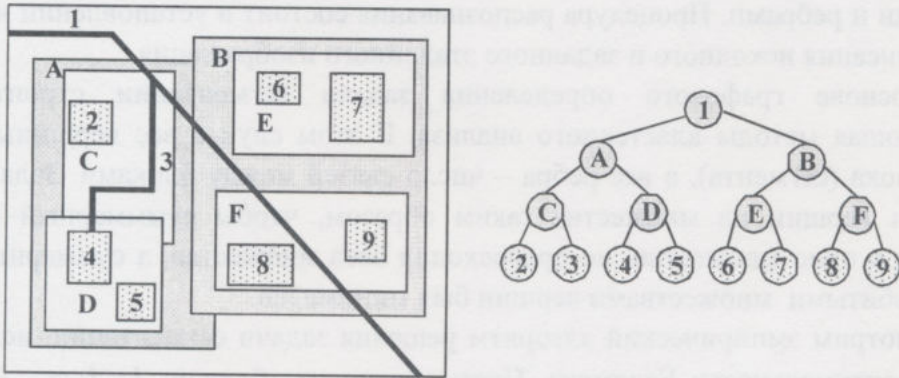


Рис.3. Индексирование элементов интегральной схемы R -деревом

Оверлейная задача на квадродеревьях заключается в совмещении квадродеревьев двух сцен и получении нового квадродерева, индексирующего обе сцены. Для этого требуется одновременно обойти оба дерева, следуя ветвям, существующим в обоих деревьях. В тех узлах, где у одного из деревьев будет отсутствовать ветвление значение атрибута переносится на все последующие подуровни [6].

Получившееся дерево детальности можно обойти, начиная с корня так, что из возможных в каждый конкретный момент путей продолжения обхода (из всех ациклических подграфов) выбирается ребро, которому соответствует разрез с минимальным весом, т.е. с более заметной границей. Алгоритм, реализующий процедуру обнаружения сегментов, представляет собой последовательность этапов построения ациклического подграфа в соответствии с априорной информацией о структурной геометрической модели изображения.

Разработанные подходы обобщают различные способы построения описаний систем, объединяют микро- и макроподходы в проектировании, делают возможным формализацию построения модели проектируемой системы обработки изображений, а также создание формального аппарата проектирования автоматизированных производственных систем.

Литература

1. **Форсайт Д., Понс Ж.** Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Вильямс, 2004. – 928 с.
2. **Вудс Р., Гонсалес Р.** Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
3. Handbook of pattern recognition and computer vision / Eds **Chen C.H., Rau L.F., Wang P.S.P.** – Singapore–New Jersey–London–Hong Kong: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1995. – 984 p.
4. Алгоритмы и структуры данных геоинформационных систем: Методические указания / Сост. **И.В.Варфоломеев, И.Г.Ермакова, А.С.Савельев.** – Красноярск: КГТУ, 2003. – 34 с.
5. **Колдаев В.Д.** Эвристические алгоритмы контурной сегментации изображений // Изв. вузов Электроника. – 2007. – № 4. – С. 71–75.
6. **Колдаев В.Д.** Квазитопологический алгоритм контурной сегментации изображений // Сб. материалов 3-й междунар. науч.-практической конф. «Достижения ученых XXI века». – Тамбов, 2007. – С. 139–141.

Статья поступила
10 апреля 2008 г.

Колдаев Виктор Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и программного обеспечения вычислительных систем МИЭТ. Область научных интересов: выделение, идентификация и распознавание изображений в системах технического зрения, функционирующих в реальном масштабе времени; разработка процедурных алгоритмов выделения и идентификации изображений в автоматизированных производственных системах; анализ и формирование информационных массивов в системах принятия решений при создании изделий электронной техники.

Книжные новинки



Динеш С. Дьюб. Электроника: схемы и анализ

Москва: Техносфера, 2008.

ISBN 978-5-94836-165-9



Разработка и анализ электронных приборов и схем составляют неотъемлемую часть университетского курса физики. Книга представляет краткое, но всестороннее изложение по данной теме. Освещены физические аспекты работы биполярных и полевых транзисторов, все схемы проанализированы с первооснов. Глава о производстве интегральных схем выделяет эту книгу из ряда аналогичных изданий. Простота и основательность изложения, большое количество примеров, задач и иллюстраций делают ее незаменимым пособием для студентов технических вузов.

Особенности функционирования и применений ассоциативной памяти

А.С.Парфененко, А.В.Рыбачек

ОАО «Ангстрем-М» (г. Москва)

Е.С.Рыбалко

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Представлен алгоритм поиска с применением ассоциативной памяти. Рассмотрены особенности применения ассоциативной памяти в приборах для организации компьютерных сетей и особенности исполнения блоков ассоциативной памяти.

Запоминающие устройства (ЗУ) с ассоциативным доступом, или память, адресуемая по содержанию (САМ – Content Addressable Memory), отличаются тем, что в них поиск и считывание информации происходят не по ее адресу, а по некоторому признаку самой информации, хранящемуся в слове. В ассоциативных ЗУ многоразрядное слово разбивается на две части: метка (или признак) и данные. Поиск информации осуществляется по значению метки. Применяются ЗУ в специальных процессорных устройствах для поиска, сортировки и упорядочивания информации.

Ассоциативная память относится к классу схем с параллельным сравнением признаков. Эти схемы работают как стандартные схемы памяти и могут использоваться для хранения двоичных данных. Однако в отличие от стандартных схем памяти они имеют специальный режим сравнения, позволяющий осуществлять параллельный поиск данных в САМ.

До недавнего времени САМ использовалась в ряде специализированных приложений, при встраивании в заказные проекты. Однако с появлением технологий уровня 0,35, 0,25 и 0,18 мкм стало возможным создание блоков ассоциативной памяти с большой информационной емкостью, а также возникла необходимость в совершенствовании архитектуры САМ. Ассоциативная память становится одним из ключевых звеньев в сетевых системах обработки и передачи информации.

Алгоритм поиска с использованием САМ. Принцип работы ассоциативной памяти легко понять при сравнении с памятью с произвольным доступом (РАМ – Random Access Memory).

Алгоритм поиска информации с использованием памяти с произвольным доступом представлен на рис.1.

Цикл поиска информации в этом случае включает следующие шаги:

- выработка процессором адреса;
- считывание данных из микросхемы памяти по данному адресу;
- сравнение полученных данных с искомой информацией.

Этот набор операций будет повторяться для каждой записи в памяти до тех пор, пока не будет найдена искомая информация. Тогда цикл будет остановлен. Например, для нахождения фамилии Сергеев (см. рис.1) требуется три цикла, так как она находится в третьей строке. В случае, если фамилия находится в первой строке, то для ее обнаружения потребуется только один цикл. Таким образом, число циклов, требуемых для обнаружения информации, зависит от расположения искомой информации в накопите-

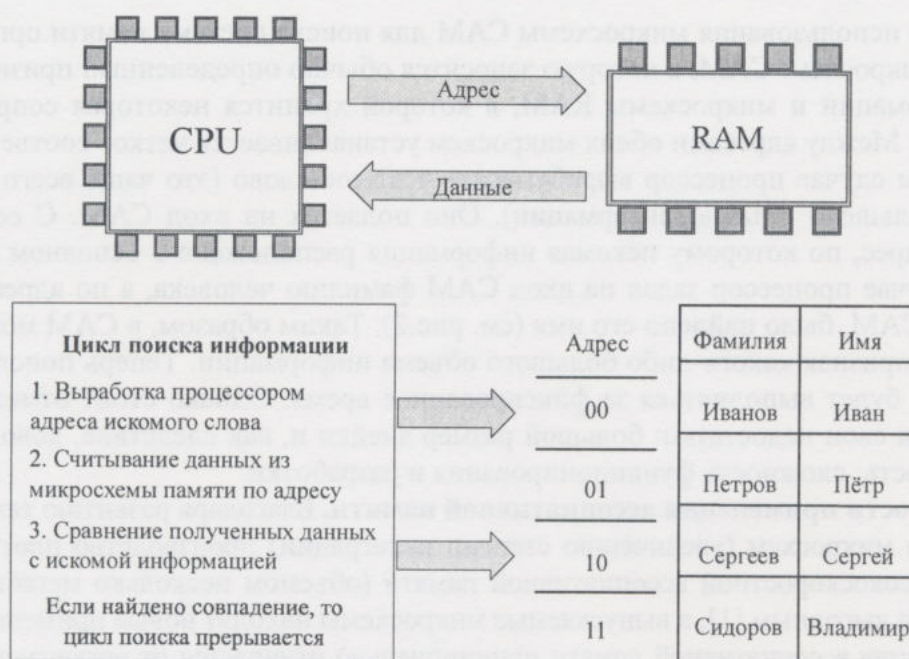


Рис. 1. Поиск информации с применением SRAM

ле. Зависимость времени поиска информации от того, насколько далеко она расположена от начала накопителя является существенным недостатком поиска при использовании RAM. Эта проблема весьма актуальна в связи с возросшими объемами обрабатываемой информации.

На рис.2 представлен алгоритм поиска информации с использованием ассоциативной памяти. Для нее цикл поиска информации состоит из подачи искомого данных на вход микросхемы и получения адреса искомой информации. Эти операции выполняются за один рабочий цикл. В данном случае время поиска не зависит от расположения искомой информации в накопителе, потому что в ассоциативной памяти происходит сравнение поданной на вход информации сразу со всеми записями в накопителе, после чего выдается сигнал о том, что искомая информация найдена или отсутствует в блоке памяти.

В базе данных может быть организован поиск имени сотрудника компании по его фамилии (см. рис.2).

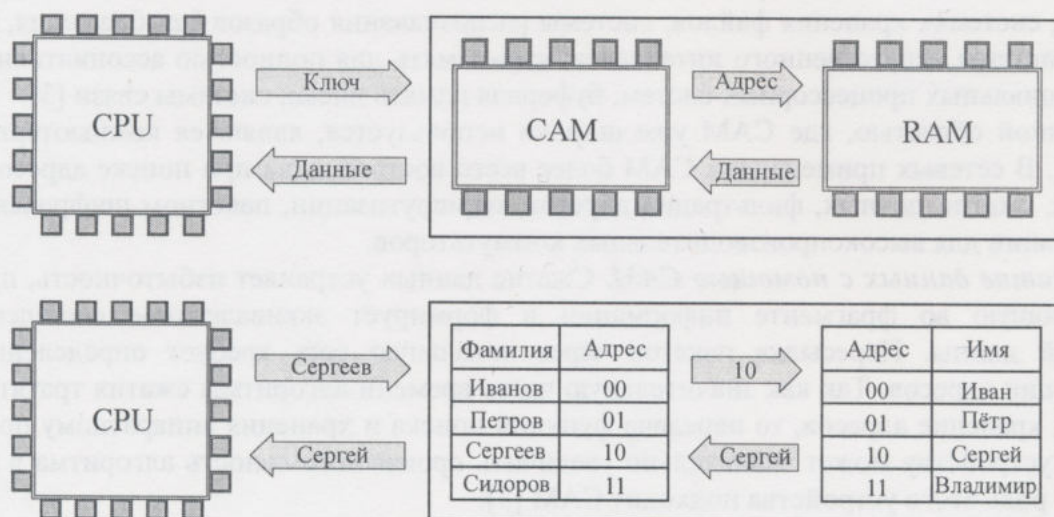


Рис. 2. Поиск информации с использованием CAM

В случае использования микросхемы САМ для поиска система памяти организуется из двух микросхем: САМ, в которую заносится обычно определенный признак некоторой информации и микросхемы RAM, в которой хранится некоторая сопряженная информация. Между адресами обеих микросхем устанавливается четкое соответствие.

В данном случае процессор вырабатывает искомое слово (это чаще всего признак какого-то большого объема информации). Оно подается на вход САМ. С ее выхода снимается адрес, по которому искомая информация расположена в основном массиве. В нашем случае процессор задал на вход САМ фамилию человека, а по адресу, полученному из САМ, было найдено его имя (см. рис.2). Таким образом, в САМ можно хранить только признак какого-либо большого объема информации. Теперь поиск нужной информации будет выполняться за фиксированное время. Однако стоит отметить, что САМ имеет и свои недостатки: большой размер ячейки и, как следствие, довольно высокая стоимость; сложность функционирования и разработки.

Особенности применения ассоциативной памяти. Благодаря развитию технологии производства микросхем (увеличению степени интеграции) производство плотноупакованной и высокоскоростной ассоциативной памяти (объемом несколько мегабит) стало экономически выгодным [1], а выпускаемые микросхемы находят новые применения.

Организация ассоциативной памяти принципиально отличается от организации памяти с произвольным доступом. Данные в ассоциативной памяти хранятся в виде таблицы, которая может загружаться при включении системы и изменяться во время ее работы.

Практически в любом блоке ассоциативной памяти имеется набор битов, которые определяют статус данной записи в накопителе. Если данная запись больше не нужна пользователю, то она может быть перезаписана. Запись информации в ассоциативную память может производиться как по адресу, поданному на адресную шину, так и в первое свободное место в памяти.

В режиме сравнения информация, поданная на вход микросхемы, сравнивается со всеми записями в памяти. Если произошло совпадение, то ассоциативная память выдает соответствующий флаг.

Одним из важнейших свойств ассоциативной памяти (тернарного типа) является ее способность хранить в ячейке одно из трех состояний: логический ноль, логическую единицу и «безразличное» состояние. Это свойство является наиболее востребованным для сетевых применений памяти [2].

Основными областями применения ассоциативной памяти являются: поиск в базах данных, системах хранения файлов; системы распознавания образов (изображения, голоса); системы искусственного интеллекта; кэш-память для полностью ассоциативных или специальных процессорных систем; буферная память диска; системы связи [3].

Важной областью, где САМ уже широко используется, являются компьютерные сети [4]. В сетевых применениях САМ более всего востребована при поиске адресов в Ethernet, сжатии данных, фильтрации адресов, маршрутизации, пакетном шифровании информации для высокопроизводительных коммутаторов.

Сжатие данных с помощью САМ. Сжатие данных устраняет избыточность, присутствующую во фрагменте информации и формирует эквивалентное сообщение меньшей длины. Пересылка пакетов через локальную сеть требует определенной трансляции адресов. Так как значительную часть времени алгоритмы сжатия тратят на поиск и хранение адресов, то передача функций поиска и хранения аппаратному поисковому устройству может значительно увеличить производительность алгоритма в целом. На роль этого устройства подходит САМ [3].

При сжатии поиск в САМ осуществляется для каждого слова из оригинального выражения. Если найден код, соответствующий шаблону во входном регистре, то соответствующий символ или знак подается на выход, а входной регистр очищается, если код не найден, то на вход подается очередное слово. САМ будет генерировать результат за одну операцию, независимо от размера таблицы. Данное свойство делает ассоциативную память идеальным кандидатом для применения в алгоритмах сжатия.

Использование САМ в сетевых коммутаторах. САМ может использоваться в сетевых коммутаторах для выделения и обработки адресной информации из входящих пакетов [3]. Для того чтобы перенаправить пакет в правильный выходной порт, выполняется сравнение адреса назначения с таблицей адресов, записанной в САМ. Например, САМ могла бы хранить Ethernet-адреса и номера портов коммутатора. Полученные данные сравниваются с таблицей, записанной в САМ, и если при сравнении выявлено совпадение, то выдается номер порта и пакет направляется к верному порту или адресу (рис.3).

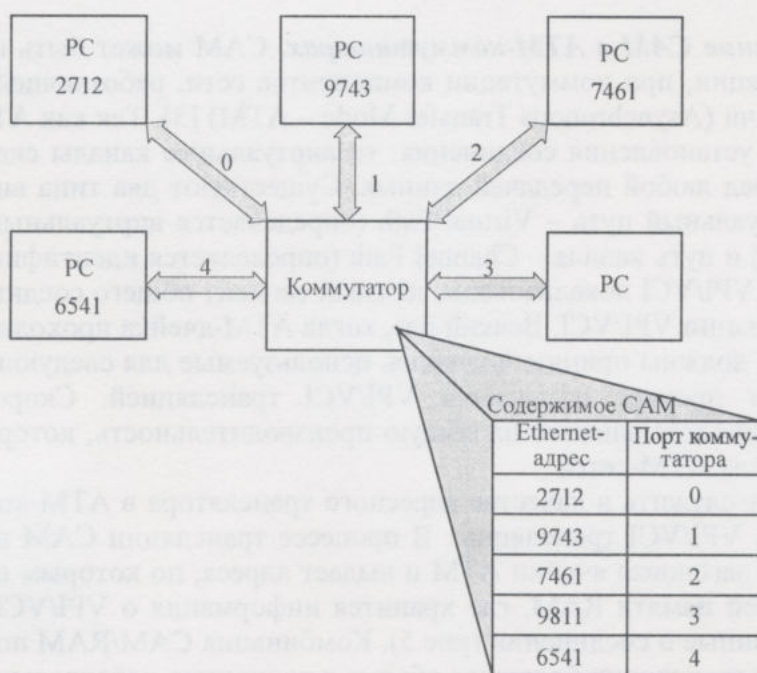


Рис. 3. Использование САМ в сетевых коммутаторах

Использование САМ для фильтрации IP-адресов. Фильтр IP-адресов служит для ограничения неавторизованного доступа к ресурсам локальной сети или трафика, проходящего через маршрутизатор, а также для управления доступом в Internet из локальной сети. Например, рабочим станциям локальной сети можно разрешить выполнение только специальных служб (таких как e-mail). САМ может быть использована как IP-фильтр, который блокирует все попытки доступа кроме тех случаев, когда пакетам даны исключительные права [3]. В этом случае происходит сравнение пакетов, поступающих в маршрутизатор, с типами пакетов, хранящимися в САМ. Если обнаружено совпадение, то пакету либо разрешается доступ, либо выдается отказ в доступе в соответствии с правилами фильтра (рис.4).

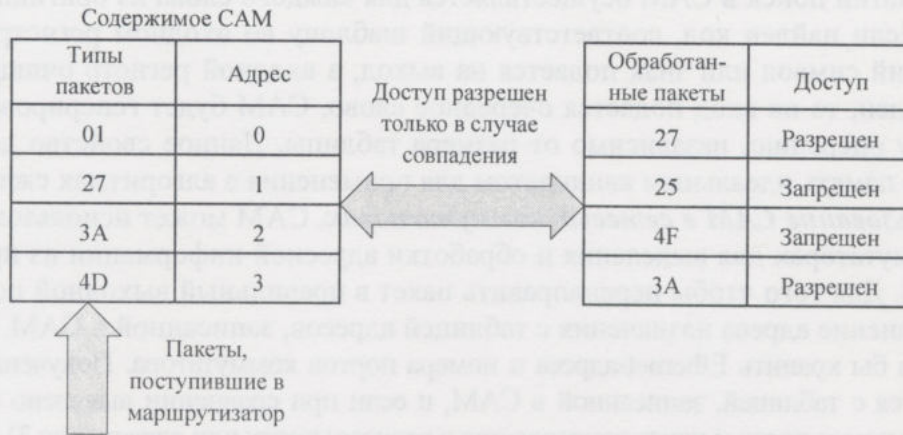


Рис. 4. Использование CAM для фильтрации IP-адресов

Использование CAM в АТМ-коммутаторах. CAM может быть использована как таблица трансляции, при коммутации компонентов сети, работающей в режиме асинхронной передачи (Asynchronous Transfer Mode – АТМ) [3]. Так как АТМ-сети – это сети, требующие установления соединения, то виртуальные каналы сквозь них должны создаваться перед любой передачей данных. Существуют два типа виртуальных каналов АТМ: виртуальный путь – Virtual Path (определяется виртуальным идентификатором пути – VPI) и путь канала – Channel Path (определяется идентификатором канала – VCI). Значения VPI/VCI локализованы, каждый сегмент общего соединения имеет уникальные комбинации VPI/VCI. Всякий раз, когда АТМ-ячейка проходит через коммутатор, ее VPI/VCI должны принять значения, используемые для следующего сегмента соединения. Этот процесс называется VPI/VCI трансляцией. Скорость трансляции оказывает критическое влияние на общую производительность, которая является важным фактором для АТМ-сетей.

CAM может служить в качестве адресного транслятора в АТМ-коммутаторе и быстро выполнять VPI/VCI трансляцию. В процессе трансляции CAM принимает значения VPI/VCI из заголовка ячейки АТМ и выдает адреса, по которым происходит обращение к внешней памяти RAM, где хранится информация о VPI/VCI отображении, а также другие данные о соединении (рис.5). Комбинация CAM/RAM позволяет реализовывать таблицы трансляции большого объема с полностью параллельным поиском.

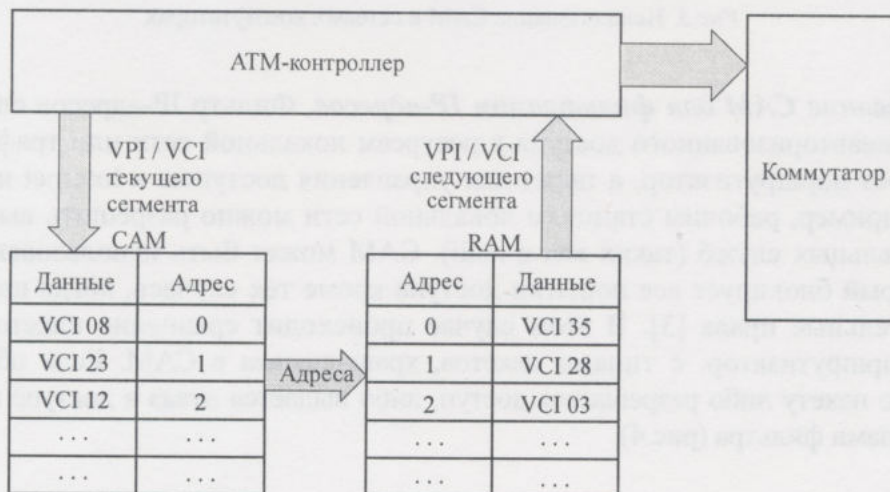


Рис. 5. Использование CAM в АТМ-коммутаторах

Аппаратные решения для САМ. Для САМ существует два типа аппаратной реализации: отдельные (или дискретные) компоненты и исполнение в виде систем-на-кристалле. Начиная с 1980 г. отдельные компоненты САМ производились как относительно специализированные устройства памяти. Такой подход позволяет разработчику использовать преимущества САМ, но при этом расходуется площадь на печатной плате. К тому же снижается общая производительность системы из-за внутренних задержек блока САМ, а также из-за задержек на соединениях между памятью и другими устройствами, расположенными на плате.

Реализация САМ на кристалле в виде встроенного функционального блока появилась сравнительно недавно. Примером такой реализации является использование встроенной САМ в последних поколениях программируемых логических устройств (PLD) [3]. Преимуществом такого использования САМ является эффективное использование площади и увеличение производительности. Увеличение производительности в данном случае достигается за счет сокращения длины связей на кристалле. Такие PLD-устройства называются встроенными системными блоками.

Данные в САМ могут загружаться во время конфигурации PLD-устройства или в процессе его работы.

Использование ассоциативной памяти в приложениях с интенсивным поиском информации имеет ряд существенных достоинств и дает проектировщикам возможность создания быстродействующих систем.

Результаты анализа алгоритмов поиска, основанных на использовании RAM и на САМ, позволяют утверждать, что использование САМ предпочтительнее, так как в этом случае время поиска не зависит от расположения информации в накопителе. Данное отличие делает САМ оптимальным решением для любой задачи, требующей быстрого поиска в памяти.

Важнейшей областью применения САМ являются компьютерные сети, где САМ используется для сжатия данных, маршрутизации и фильтрации IP-адресов, а также для коммутации различных сегментов АТМ-сетей.

Перспективным направлением является использование САМ в базах данных, системах распознавания образов или для управления кэш-памятью в современных микропроцессорах.

Ассоциативная память реализуется как в виде отдельных микросхем, так и в качестве компонента систем-на-кристалле. Примером такой реализации может быть встраивание САМ в программируемые логические устройства.

Развитие и совершенствование технологий микроэлектроники, а также разработка новых архитектурных и схемотехнических решений позволит существенно расширить круг использования ассоциативной памяти, добавив к уже существующим, например, и мобильные применения.

Литература

1. BCC Research. Computer Memory: Important trends and directions. – Режим доступа: <http://www.bccresearch.com/RepTemplate.cfm?ReportID=345&cat=itt&RepDet=SC&target=repdetail.cfm>.
2. Mohan N., Sadchev M. A static power reduction technique for ternary content-addressable memories // Proc. of the IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), Niagara Falls. – May 2–5. – 2004. – P. 711–714.
3. Sherri Azgomi. Using content-addressable memory for networking applications. Altera International Ltd. – Режим доступа: <http://www.commsdesign.com/main/1999/11/9911feat3.htm>.
4. Kostas Pagiamtzis, Ali Sheikholeslami. Content-Addressable Memory (CAM) circuits and architectures: a tutorial and survey // IEEE J. of Solid-States Circuits. – Vol. 41, N 3, March 2006.

Статья поступила 22 апреля 2008 г.

Парфененко Александр Сергеевич – аспирант ОАО «Ангстрем-М» (г. Москва). Область научных интересов: статическая память, ассоциативная память, компиляторы памяти.

Рыбачек Андрей Владимирович – руководитель дизайн-группы Front-End проектирования ОАО «Ангстрем-М» (г. Москва). Область научных интересов: вычислительная техника, защита от воздействия статического электричества.

Рыбалко Егор Сергеевич – магистрант Института проектирования приборов и систем (Cadence) МИЭТ. Область научных интересов: ассоциативная память, методики уменьшения потребляемой мощности в блоках ассоциативной памяти, компиляторы памяти.

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.396.67

Исследование алгоритма множественного доступа с пространственным разделением каналов в системе с цифровой антенной решеткой

Ж.В. Чиркунова, К.С. Лялин, В.И. Орешкин

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Рассмотрена возможность применения многолучевой цифровой антенной решетки для создания систем множественного доступа с пространственным разделением каналов. Дана классификация основных алгоритмов пространственной обработки сигналов. Описан метод построения диаграммы направленности заданной формы. Приведены результаты исследований алгоритма формирования многолучевой диаграммы направленности для реализации множественного доступа.

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/(помеха + шум) (ОСПШ) в нем. Одна из наиболее существенных проблем в системах беспроводной связи – снижение уровня активных помех, т.е. тех составляющих шума канала, которые являются следствием наличия в эфире других источников радиосигнала, например соседних базовых станций сотовой телефонии. Наряду с этой проблемой стоит задача увеличения количества пользователей базовой станции, работающих одновременно на одной частоте.

В настоящее время для увеличения информационной емкости каналов связи применяются различные схемы уплотнения пользователей, основанные на разделении между станциями таких параметров, как положение в пространстве, время работы, частота и код. Задача уплотнения – выделить каждому каналу связи положение в пространстве, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды. В связи с этим одним из наиболее перспективных подходов является применение пространственного разделения каналов (SDMA – space-division multiple access) и пространственной фильтрации на базе антенных решеток с возможностью цифрового диаграммообразования (ЦДО).

ЦДО обеспечивает прецизионную селекцию сигналов по направлениям прихода, в том числе в пределах одного луча диаграммы направленности (ДН). В результате возрастают число работоспособных каналов и емкость сети. Современные системы с адаптивными цифровыми антенными решетками (ЦАР) позволяют множеству пользователей работать на одном частотном канале за счет учета их пространственного

разнесения. Кроме того, в зависимости от сложности системы базовые станции могут формировать «заказные» лучи приема/передачи сигналов персонально для каждого мобильного пользователя. При этом в реальном масштабе времени синтезируется модель канала связи, учитывающая взаимное положение абонентов и источников помех, на основе которой строится стратегия приема/передачи. В зарубежной литературе цифровые антенные решетки принято называть интеллектуальными антеннами (Smart Antennas) [1].

ЦАР являются новым научно-техническим направлением в радиоинформационной системотехнике, результаты развития которого создают основу для резкого, скачкообразного увеличения эффективности наземных и космических систем радиолокации, радиосвязи, радионавигации, радиоразведки и средств радиоэлектронной борьбы.

Идеи ЦАР и цифровой обработки сигналов известны давно, но благодаря фантастическим достижениям в области СВЧ-электроники, монокристалльной электроники АЦП и ЦАП, сверхбыстродействующей цифровой и компьютерной электроники возникли принципиально новые возможности создания ЦАР. Кроме того, применение цифровых антенных решеток позволяет уменьшить массогабаритные размеры радиосистемы, повысить чувствительность приемного тракта, получить возможность практически плавного перемещения луча, без больших дополнительных аппаратных затрат формировать одновременно множество лучей в желаемых направлениях, а также реализовать управление амплитудно-фазовым распределением в раскрыве антенны в реальном масштабе времени с целью пространственной селекции сигналов за счет их корреляционной обработки.

Целью данной работы является разработка алгоритма формирования диаграммы направленности антенны заданной формы для реализации множественного доступа с пространственным разделением пользователей на базе цифровой антенной решетки. Данный алгоритм должен обеспечивать поиск направлений прихода сигналов в пространстве, их разделение, а также вычисление комплексных весовых коэффициентов для формирования луча (ряда лучей).

Модель весового вектора. Решение поставленной задачи целесообразно начать с нахождения оптимального метода определения весовых коэффициентов. В качестве критерия оптимальности примем критерий максимизации выходного отношения сигнал/(помеха+шум) [2]. При этом сигналом естественно считать то, что принимается с направления в пространстве, в котором сфазирована решетка и установлен максимум исходной диаграммы направленности, а помехой – все, что принимается с любых других направлений. В [3] подробно описан процесс получения оптимального весового вектора:

$$J_{opt} = R^{-1/2} S / \sqrt{S^H R^{-2} S / N}, \quad (1)$$

здесь N – количество элементов решетки; R – корреляционная матрица входных сигналов; S – управляющий вектор, характеризующий направление приема полезного сигнала; H – знак эрмитовой сопряженности.

Теоретически получена возможность строго вычислять значения весовых коэффициентов решетки для любой заданной ситуации, однако прямая реализация оптимального решения достаточно сложна.

Алгоритмы поиска весового вектора. Существует ряд алгоритмов нахождения весового вектора с многочисленными вариантами и модификациями, среди которых выделяют три основные группы:

- прямые методы оценки, реализующие оптимальное решение или, по крайней мере, приближающиеся к такой реализации;
- методы оценки при малом числе обучающих выборок;

- итерационный (градиентный) метод, практически абсолютно неактуальный, но представляющий самостоятельное направление и значительный этап в развитии адаптивных решеток.

Все эти алгоритмы связаны с получением оценки прямой или обратной корреляционной матрицы входных сигналов или функций от них, что неизбежно сопровождается большим объемом вычислений. Отсутствие удобных способов выполнения таких вычислений и обусловило необходимость моделирования и исследования данных методов.

Математическое моделирование алгоритма построения диаграммы направленности заданной формы. При построении модели за основу взята линейная эквидистантная решетка, для которой используется следующее выражение для ДН излучающей апертуры с дискретными изотропными излучателями [4]:

$$F(\theta) = \sum_{i=1}^N J_i e^{jk(i-1)dx \sin(\theta)}, \quad (2)$$

где N – количество элементов решетки; J_i – амплитудно-фазовый множитель, характеризующий значения амплитуды и фазы на излучателях; dx – межэлементное расстояние; θ – угол наблюдения.

При проектировании системы была решена задача нахождения оптимального весового вектора J или, другими словами, задача формирования диаграммы направленности заданной формы. Для этого весовые коэффициенты вычислялись непосредственно, исходя из направления на сигнал и помеху, путем решения системы уравнений. Основной идеей этого метода является представление о 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:

$$\begin{cases} |J_1| + |J_2 z_{scan}| + \dots + |J_N (z_{scan})^{N-1}| - \\ - |J_1 + J_2 z_{scan} + \dots + J_N (z_{scan})^{N-1}| = \Delta, \\ J_1 + J_2 z_{scan} + \dots + J_N (z_{scan})^{N-1} = \\ = (\sqrt{N} - \Delta) e^{j \arg(J_1 + J_2 z_{scan} + \dots + J_N (z_{scan})^{N-1})}, \\ J_1 + J_2 z_1 + \dots + J_N (z_1)^{N-1} = 0, \\ \dots \\ J_1 + J_2 z_{N-2} + \dots + J_N (z_{N-2})^{N-1} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь J_i – комплексная амплитуда тока на каждом элементе; $z_i = e^{jkdx \sin(\theta_{null i})}$, где

$\theta_{null i}$ – угловое направление нуля ДН; j – мнимая единица; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число;

dx – межэлементное расстояние; $1 < i < N-2$; $z_{scan} = e^{jkdx \sin(\theta_{scan})}$, где θ_{scan} – угловое направление на главный максимум ДН; Δ – уменьшение амплитуды главного лепестка ДН; N – количество элементов в решетке.

Таким образом, имеем полную систему из N нелинейных уравнений (3), 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 помехи, а также могут быть получены выражения для амплитудно-фазовых коэффициентов. Назовем данный алгоритм методом нелинейной системы. Диаграммы направленности, построенные в результа-

те моделирования в среде MathCAD, представлены на рис.1. В качестве модели выбрана четырехэлементная антенная решетка с межэлементным расстоянием $0,8\lambda$.

Очевидно, что ДН, сформированные с помощью метода нелинейной системы, полностью удовлетворяют требованиям построения диаграмм направленности заданной формы, т.е. осуществляется глубокое подавление помех (в том числе и в основном луче). При этом существует возможность сканирования с сохранением приемлемого уровня основного луча.

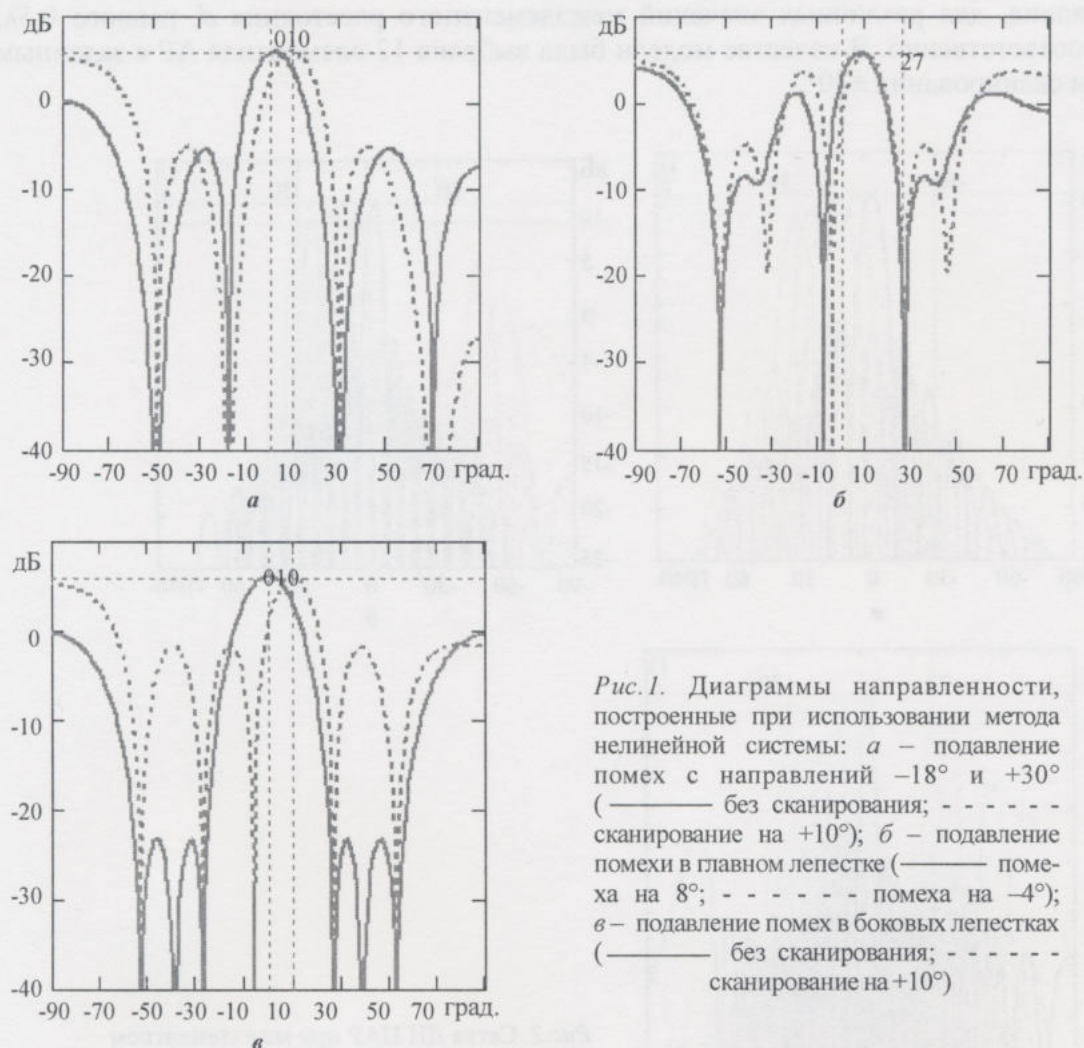


Рис.1. Диаграммы направленности, построенные при использовании метода нелинейной системы: а – подавление помех с направлений -18° и $+30^\circ$ (— без сканирования; - - - сканирование на $+10^\circ$); б – подавление помехи в главном лепестке (— помеха на 8° ; - - - помеха на -4°); в – подавление помех в боковых лепестках (— без сканирования; - - - сканирование на $+10^\circ$)

Математическое моделирование алгоритма формирования нескольких лучей.

Алгоритм формирования нескольких лучей строится на основе рассмотренного метода нелинейной системы. Из теории многолучевых АР известно, что для формирования M независимых лучей необходимо, как минимум, иметь в составе решетки $N = M$ излучателей. Специфика ЦАР заключается в том, что в данном случае необходимо иметь на два элемента больше, т.е. $M + 2$ элемента. Это связано с необходимостью получения дополнительной информации для алгоритмов адаптации с целью обнаружения и подавления нежелательных помех.

Кроме того, для получения нужного количества независимых лучей необходимо правильно выбрать межэлементное расстояние. Критериями выбора оптимального межэлементного расстояния являются:

- уровень пересечения соседних лучей (чем больше эта величина, тем более высока развязка между этими лучами);
- местоположение ближайшего дифракционного максимума относительно заданного сектора сканирования (чем дальше дифракционный максимум от рабочего сектора сканирования, тем меньше вероятность ложного срабатывания ЦАР).

На рис.2 представлены результаты математического моделирования сетки из $N - 2$ независимо сформированных ДН, равноразнесенных в пространстве заданного сектора сканирования, для различных значений межэлементного расстояния d , равного $0,5\lambda$; $0,8\lambda$; λ соответственно. В качестве модели была выбрана 12-элементная АР с заданным сектором сканирования $\pm 30^\circ$.

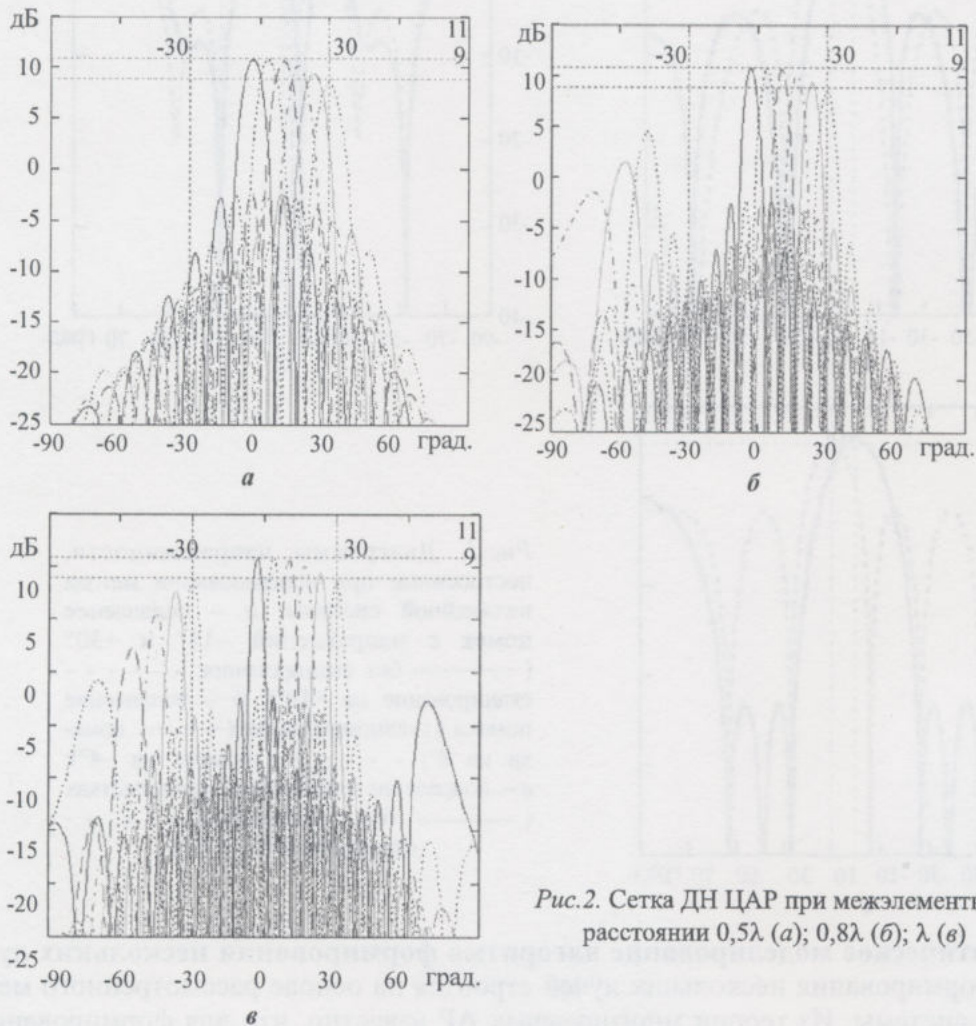


Рис.2. Сетка ДН ЦАР при межэлементном расстоянии $0,5\lambda$ (а); $0,8\lambda$ (б); λ (в)

Анализ данных, представленных на рис.2–4, показывает, что при малых межэлементных расстояниях $d \sim 0,5\lambda$ дифракционные максимумы либо вообще не появляются в видимой области, либо подавлены ДН элемента решетки. При этом уровень пересечения соседних ДН не превышает порядка -1 дБ, что явно недостаточно для хорошей развязки между этими лучами. При межэлементном расстоянии $d \sim \lambda$, напротив, уровень пересечения соседних лучей превышает -6 дБ, однако в области рабочего сектора углов уже появляется дифракционный максимум, что недопустимо. Для решения поставленной задачи применительно к выбранной модели наиболее подходящим является

межэлементное расстояние $d = 0,8\lambda$, которое обеспечивает развязку между соседними лучами порядка $-4,5$ дБ и ближайший дифракционный максимум находится под углом порядка -45° , что допустимо.

Таким образом, построение систем множественного доступа с пространственным разделением каналов может быть успешно реализовано на базе цифровых антенных решеток. При этом в качестве алгоритма формирования нескольких хорошо «развязанных» между собой лучей используется метод нелинейной системы, который также позволяет реализовать пространственную фильтрацию в ЦАР, повышая тем самым информационную емкость канала связи.

Литература

1. *Liberti J.C., Rappaport T.S.* Smart antennas for wireless communications. – N.J.: Prentice Hall PTR. – 1999. – 380 p.
2. *Brennan L.E., Reed I.S.* Theory of adaptive radar // IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems. – 1972. – Vol. 8. – N.5. – P. 690 – 692.
3. *Ратынский М.В.* Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. – М.: Радио и связь, 2003. – 200 с.
4. *Чистюхин В.В.* Антенно-фидерные устройства: Учеб. пособие. – М.: МИЭТ, 1997. – 232 с.

Статья поступила
19 ноября 2007 г.

Лялин Константин Сергеевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры микроволновых радиотехнических устройств и систем (МРТУС) МИЭТ. Область научных интересов: антенно-фидерные устройства.

Чиркунова Жанна Владимировна – аспирант кафедры МРТУС МИЭТ. Область научных интересов: антенно-фидерные устройства, цифровая обработка сигналов.

Орешкин Виталий Иванович – аспирант кафедры МРТУС МИЭТ. Область научных интересов: цифровая обработка сигналов и антенно-фидерные устройства.

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

С тематическими указателями статей за 1996 - 2008 гг., аннотациями и содержанием последних номеров можно ознакомиться на нашем сайте:

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

Проблемы построения фильтра Калмана в многоантенной системе на основе спутниковых сигналов GPS/GLONASS

В.Е.Алексеев, Ю.В.Савченко

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

А.Н.Соловьев

Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (г. Москва)

Рассмотрен один из наиболее эффективных алгоритмов поиска плавающего решения на основе фильтра Калмана в многоантенных GPS/GLONASS системах. Особое внимание уделено проблемам реализации данного алгоритма, связанным с изменением группировки наблюдаемых спутников. Предложены способы решения данных проблем, а также приведена экспериментальная оценка данных способов.

Достоинством многоантенных систем на основе спутниковых сигналов GPS/GLONASS является высокая по сравнению с одноантенными точность позиционирования, которая достигается благодаря использованию фазовых измерений, обладающих более высокой чувствительностью, но при этом содержащих фазовую неоднозначность. Традиционно применяются два последовательных шага для устранения фазовой неоднозначности: поиск плавающего решения, для которого погрешность позиционирования составляет дециметры; поиск фиксированного решения с погрешностью позиционирования на уровне сантиметров. Эффективность поиска фиксированного решения в значительной степени зависит от реализации алгоритма поиска плавающего решения, ключевой процедурой которого является фильтр Калмана.

Структура фильтра Калмана. Общий вид структуры фильтра Калмана [1] приведен на рис.1.

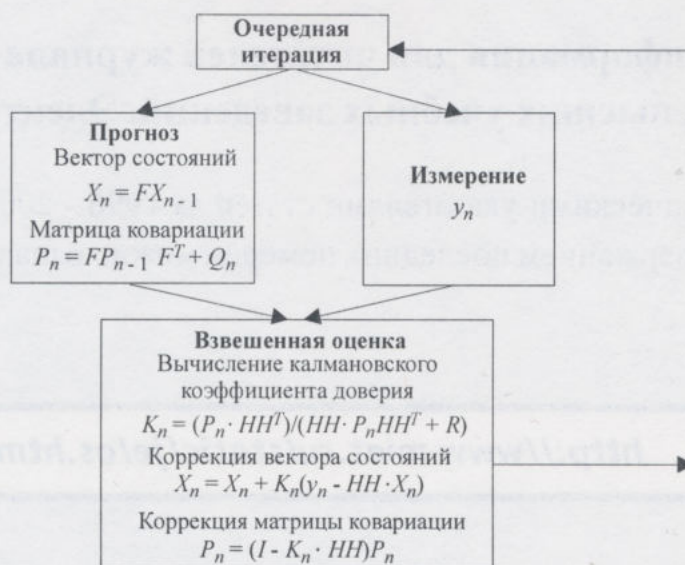


Рис.1. Общая структура фильтра Калмана

В структуре используются обозначения: X_n – вектор состояний, характеризующий основные искомые параметры системы: вектор базы b и элементы неоднозначностей N ; F – матрица перехода от предыдущего шага к текущему; P_n – матрица ковариации, характеризующая корреляцию элементов в векторе состояний; Q_n – матрица ошибок, полученных на текущем шаге; K_n – коэффициент доверия фильтра Калмана; HN – матрица перевода прогноза вектора состояний в пространство измерений; R – матрица ошибок измерения; y_n – измеряемые параметры; I – единичная матрица.

Устойчивость фильтра Калмана и его сходимость в значительной степени зависят от выбора прогноза и измерения. Существуют различные подходы к их выбору, одним из которых является сглаживание двойных кодовых разностей на основе двойных фазовых [2] и оценивание параметров b и N по сглаженным значениям. В связи с тем, что кодовые измерения достаточно грубые, скорость сходимости такого фильтра будет невысокой. Более эффективным является подход сглаживания двойных фазовых разностей на основе тройных разностей [3], который выбран за основу.

Вектор состояний представим как

$$X_n = [b_x, b_y, b_z, N_1, N_2 \dots N_m]^T,$$

где b_x, b_y, b_z – элементы вектора базы b , который соединяет антенны двух приемников; $N_1, N_2 \dots N_m$ – элементы вектора неоднозначностей, где m – число пар спутников.

В качестве прогноза используются двойные фазовые разности, полученные на основе вектора базы $\hat{b}(t_i)$, вычисленного с использованием вектора $b(t_{i-1})$ на предыдущем шаге и приращения $\Delta b(t_i)$ на текущем шаге:

$$\hat{b}(t_i) = b(t_{i-1}) + \Delta b(t_i).$$

Приращение $\Delta b(t_i)$ вычисляется с применением тройных разностей $TD(t_i)$ [3]:

$$\Delta b = (H^T \cdot H)^{-1} H^T \cdot [TD(t_i) - (H(t_i) - H(t_{i-1}))b(t_{i-1})],$$

где H – матрица единичных направляющих векторов.

В качестве измерения y_n используются двойные фазовые разности, построенные непосредственно на основе данных, полученных от GPS/GLONASS приемника.

Взвешенная оценка прогноза и измерения, выходные значения фильтра. В основе работы фильтра Калмана лежит взвешенная оценка прогноза и измерения, что позволяет оптимально использовать избыточность входных данных и присваивать при этом больший вес тем входным величинам, которые характеризуются меньшей ошибкой. Для того чтобы найти взвешенную оценку прогноза и измерения, необходимо перевести их в единую метрику (пространство). Для этого прогнозируемое значение вектора $\hat{b}(t_i)$ проецируют на пространство двойных разностей с помощью специальной матрицы перехода HN . Структура данной матрицы имеет вид

$$HH = \begin{bmatrix} e_{1,2x} & e_{1,2y} & e_{1,2z} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ e_{1,3x} & e_{1,3y} & e_{1,3z} & 0 & 1 & 0 & 0 \\ e_{1,4x} & e_{1,4y} & e_{1,4z} & 0 & 0 & 1 & 0 \\ e_{1,5x} & e_{1,5y} & e_{1,5z} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Матрица (1) приведена для случая с 5 спутниками, при этом образовано 4 пары спутников: (1–2), (1–3), (1–4), (1–5). Прогноз двойных разностей $\hat{DD}_{\text{ср}}$ формируется на основе произведения матрицы перехода HH на $\hat{b}(t_i)$:

$$\hat{DD}_{\text{ср}} = HH \cdot \hat{b}(t_i).$$

Следовательно, новое значение вектора состояний после коррекции принимает следующий вид:

$$X_n = X_n + K_n(DD_{\text{ср}} - \hat{DD}_{\text{ср}}) = X_n + K_n[DD_{\text{ср}} - HH \cdot \hat{b}(t_i)].$$

Выходные значения фильтра, содержащиеся в векторе состояний X_n , образуют плавающее решение.

Проблемы построения фильтра Калмана. Проведенный анализ показал, что наибольшие проблемы при реализации фильтра Калмана в рамках предлагаемого подхода возникают при изменениях рабочей группировки спутников: внезапной потере спутника, появлении новых спутников. Неучет подобных изменений неизбежно ведет к расхождению фильтра и деградации точности позиционирования. Причиной данных изменений являются как геометрическое перемещение спутников относительно приемника, так и переход отношения сигнал/шум для того или иного спутника через минимально допустимый порог. Условно данные переходные этапы можно разбить на четыре группы:

- 1) добавление спутника (или спутников);
- 2) потеря спутника (или спутников);
- 3) переход к новому опорному спутнику. Под «опорным» понимается спутник, относительно которого строятся все пары для двойных разностей. Необходимость данного перехода может быть обусловлена, например, тем, что вследствие изменения положения текущего опорного спутника относительно приемника значительно ухудшается качество принимаемого сигнала (происходит рост уровня шума);
- 4) потеря опорного спутника. Данный случай является комбинацией 2 и 3-й группы, так как для устойчивой работы фильтра потребуется вернуться к предыдущему шагу (до потери опорного спутника), осуществить переход к новому опорному спутнику, а затем удалить элементы, соответствующие потерянным спутникам.

Первые две группы переходных этапов представляют собой наиболее простые ситуации: в вектор состояний и матрицу ковариации необходимо добавить или, наоборот, удалить соответствующие элементы. Наиболее сложным является переход к новому опорному спутнику, так как при этом необходимо полностью перестраивать матрицу ковариации и вектор состояний, иначе может начаться расхождение фильтра.

В качестве примера рассмотрим случай, когда два приемника одновременно принимают сигналы от 4 спутников, на основе которых могут быть сформированы 3 двой-

ные разности с образованием следующих пар: (1–2), (1–3), (1–4), где 1, 2, ..., 4 – порядковые номера спутников, при этом спутник № 1 является опорным. Тогда с учетом структуры фильтра имеем следующие исходные данные:

- вектор состояний фильтра Калмана: $X_n = \{B, N\}$, состоящий из вектора базы: $B = \{B_X, B_Y, B_Z\}$ и вектора неоднозначностей: $N = \{N_{12}, N_{13}, N_{14}\}$;

- матрица ковариации P_n :

$$P_n = \begin{bmatrix} D(B_X) & \text{cov}(B_X, B_Y) & \text{cov}(B_X, B_Z) & \text{cov}(B_X, N_{12}) & \text{cov}(B_X, N_{13}) & \text{cov}(B_X, N_{14}) \\ \text{cov}(B_X, B_Y) & D(B_Y) & \text{cov}(B_Y, B_Z) & \text{cov}(B_Y, N_{12}) & \text{cov}(B_Y, N_{13}) & \text{cov}(B_Y, N_{14}) \\ \text{cov}(B_X, B_Z) & \text{cov}(B_Y, B_Z) & D(B_Z) & \text{cov}(B_Z, N_{12}) & \text{cov}(B_Z, N_{13}) & \text{cov}(B_Z, N_{14}) \\ \text{cov}(B_X, N_{12}) & \text{cov}(B_Y, N_{12}) & \text{cov}(B_Z, N_{12}) & D(N_{12}) & \text{cov}(N_{12}, N_{13}) & \text{cov}(N_{12}, N_{14}) \\ \text{cov}(B_X, N_{13}) & \text{cov}(B_Y, N_{13}) & \text{cov}(B_Z, N_{13}) & \text{cov}(N_{12}, N_{13}) & D(N_{13}) & \text{cov}(N_{13}, N_{14}) \\ \text{cov}(B_X, N_{14}) & \text{cov}(B_Y, N_{14}) & \text{cov}(B_Z, N_{14}) & \text{cov}(N_{12}, N_{14}) & \text{cov}(N_{13}, N_{14}) & D(N_{14}) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $D(\dots)$ – дисперсия; $\text{cov}(\dots)$ – ковариация.

Рассмотрим случай, когда новым опорным спутником становится спутник № 2. При этом порядок образования пар меняется на следующий: (2–1), (2–3), (2–4).

Получение нового вектора состояний $X'_n = \{B', N'\}$ рассматривается только для второй составляющей N' , так как вектор базы B' не связан с числом и составом наблюдаемых спутников и при данном переходе не изменяется, т.е. $B' = B$. Элементы нового вектора неоднозначностей $N' = \{N_{21}, N_{23}, N_{24}\}$ получаются в виде линейных комбинаций «старых» неоднозначностей:

$$\begin{aligned} N_{21} &= -N_{12}, \\ N_{23} &= N_{13} - N_{12}, \\ N_{24} &= N_{14} - N_{12}. \end{aligned} \quad (3)$$

Как видно из (3) N_{21} получается на основе простой смены знака неоднозначности, а модуль величины сохраняется прежним. В дальнейшем будем называть данную неоднозначность симметричной, а остальные неоднозначности – несимметричными.

Для удобства используем матрицу-оператор NT :

$$N' = NT \cdot N. \quad (4)$$

С учетом (3) получим

$$NT = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

В итоге получено новое значение вектора состояний фильтра X'_n , соответствующее состоянию системы с новым опорным спутником:

$$X'_n = \{B', N'\} = \{B', NT \cdot N\}.$$

Главным свойством матрицы ковариации является ее симметричность ($P_n^T = P_n$), упрощающая процесс перестроения данной матрицы. Для удобства составления новой матрицы ковариации P'_n разобьем ее на составные части:

- dB: дисперсии элементов вектора базы;
- dN: дисперсии элементов вектора неоднозначностей;
- cB: ковариации элементов вектора базы между собой;
- cSB: ковариации симметричной неоднозначности и вектора базы;
- cNB: ковариации несимметричных неоднозначностей и вектора базы;
- cSN: ковариации симметричной и несимметричных неоднозначностей;
- cNN: ковариации двух несимметричных неоднозначностей.

С учетом введенных выше обозначений матрица ковариации P'_n имеет следующий вид:

dB	cB	cB	cSB	cNB	cNB
cB	dB	cB	cSB	cNB	cNB
cB	cB	dB	cSB	cNB	cNB
cSB	cSB	cSB	dN	cSN	cSN
cNB	cNB	cNB	cSN	dN	cNN
cNB	cNB	cNB	cSN	cNN	dN

Элементы полученной матрицы P'_n составляются на основе элементов старого значения матрицы P_n следующим образом.

1. dB: дисперсии элементов вектора базы. Диагональные элементы $D(B_X)$, $D(B_Y)$, $D(B_Z)$ сохраняются прежними.

2. dN: дисперсии элементов вектора неоднозначностей

- $D(N_{21}) = D(-N_{12})$.

По правилу симметричности дисперсии $D(N_{21}) = D(-N_{12}) = D(N_{12})$.

- $D(N_{23}) = D(N_{13} - N_{12})$.

Дисперсия обладает следующим свойством:

$$DY = \sum_{i=1}^n a_i^2 DX_i + \sum_{i \neq j} a_i a_j \text{cov}(X_i, X_j) = \sum_{i=1}^n a_i^2 DX_i + 2 \sum_{i < j} a_i a_j \text{cov}(X_i, X_j), \quad (5)$$

где X_1, \dots, X_n – случайные величины, а $Y = \sum_{i=1}^n a_i X_i$, $a_i \in R$ – их произвольная линейная комбинация [4]. С учетом (5) для $D(N_{23})$ имеем:

$$D(N_{23}) = D(N_{13}) + D(N_{12}) - 2 \text{cov}(N_{13}, N_{12}). \quad (6)$$

- $D(N_{24})$

$$D(N_{24}) = D(N_{14} - N_{12}).$$

Аналогично (6) определяем $D(N_{24})$:

$$D(N_{24}) = D(N_{14}) + D(N_{12}) - 2 \text{cov}(N_{14}, N_{12}).$$

3. *cB*: ковариации элементов вектора базы между собой

$\text{cov}(B_X, B_Y)$, $\text{cov}(B_X, B_Z)$, $\text{cov}(B_Y, B_Z)$ сохраняются прежними.

4. *cSB*: ковариации симметричной неоднозначности и вектора базы

$$\text{cov}(B_X, N_{21}) = -\text{cov}(B_X, N_{12}),$$

$$\text{cov}(B_Y, N_{21}) = -\text{cov}(B_Y, N_{12}),$$

$$\text{cov}(B_Z, N_{21}) = -\text{cov}(B_Z, N_{12}).$$

5. *cNB*: ковариации несимметричных неоднозначностей и вектора базы

$$\text{cov}(B_X, N_{23}) = \text{cov}(B_X, N_{13} - N_{12}) = \text{cov}(B_X, N_{13}) - \text{cov}(B_X, N_{12}), \quad (7)$$

$$\text{cov}(B_X, N_{24}) = \text{cov}(B_X, N_{14}) - \text{cov}(B_X, N_{12}). \quad (8)$$

Аналогично (7) и (8) получаются выражения для $\text{cov}(B_Y, \dots)$ и $\text{cov}(B_Z, \dots)$.

6. *cSN*: ковариации симметричной и несимметричных неоднозначностей

$$\text{cov}(N_{21}, N_{23}) = \text{cov}(-N_{12}, N_{13} - N_{12}).$$

Из определения ковариации двух произвольных случайных величин a и b :

$$\text{cov}(a, b) = E(ab) - E(a)E(b), \quad (9)$$

где E – оператор вычисления математического ожидания.

С учетом (9) имеем

$$\text{cov}(a, a+b) = \text{cov}(a, b) + D(a). \quad (10)$$

С учетом (10) имеем

$$\text{cov}(N_{21}, N_{23}) = \text{cov}(-N_{12}, N_{13}) + D(-N_{12}) = -\text{cov}(N_{12}, N_{13}) + D(N_{12}). \quad (11)$$

Аналогично (11) получаем

$$\text{cov}(N_{21}, N_{24}) = -\text{cov}(N_{12}, N_{14}) + D(N_{12}).$$

7. *cNN*: ковариации двух несимметричных неоднозначностей

$$\text{cov}(N_{23}, N_{24}) = \text{cov}(N_{13} - N_{12}, N_{14} - N_{12}).$$

С учетом основного свойства ковариации

$$\text{cov}(a+c, b+c) = \text{cov}(a, b) + \text{cov}(a, c) + \text{cov}(b, c) + D(c) \quad (12)$$

и выражения (12) получим

$$\text{cov}(N_{23}, N_{24}) = \text{cov}(N_{13}, N_{14}) - \text{cov}(N_{13}, N_{12}) - \text{cov}(N_{12}, N_{14}) + D(N_{12}).$$

Оценка корректности предложенного подхода коррекции элементов фильтра Калмана при переходе к новому опорному спутнику была проведена на основе реальных экс-

периментальных данных, собранных с помощью двух GPS/GLONASS приемников К-161 [5] на неподвижной базе.

Графики зависимости от времени модуля вектора базы $|B(t_i)|$ и составляющих вектора $B_x(t_i)$, $B_y(t_i)$, $B_z(t_i)$ представлены на рис.2.

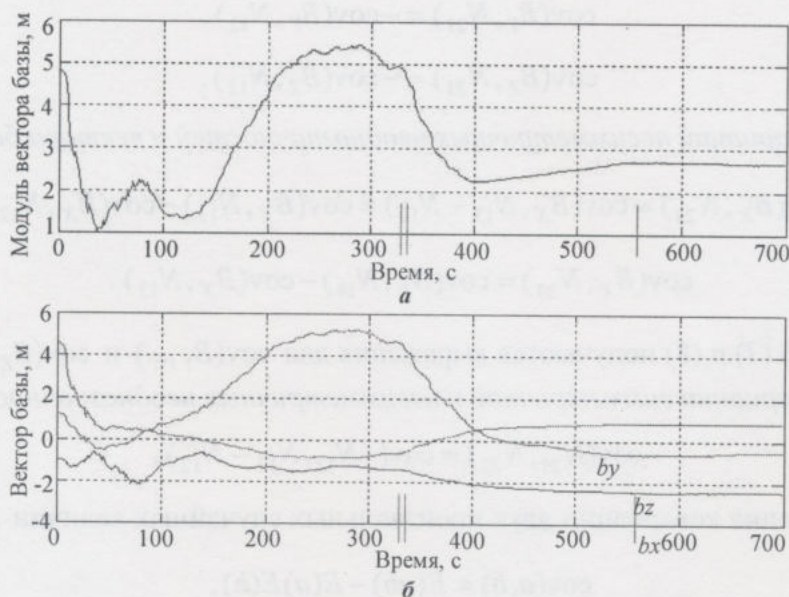


Рис.2. Графики модуля (а) и составляющих по трем осям x , y , z вектора базы (б)

Данные графики отражают характер и сходимость работы фильтра. На оси абсцисс вертикальными засечками отмечены эпохи, когда происходили переходы к новому опорному спутнику. Данные переходы происходили для следующих эпох: $t = 316$ с при потере опорного спутника; $t = 318$ с и $t = 553$ с при появлении спутника с более высоким вознесением, чем у текущего опорного спутника. Представленные графики демонстрируют устойчивую работу фильтра.

Рассмотренная общая структура фильтра Калмана является ключевой процедурой для нахождения плавающего решения в многоантенных системах на основе спутниковых сигналов GPS/GLONASS. Предложенный подход позволяет выбрать прогноз и измерения фильтра с использованием двойных и тройных фазовых разностей. С учетом экспериментальной оценки предложенной методики на основе реальных данных, снятых с GPS/GLONASS приемников, можно сделать вывод о корректности и эффективности рассмотренного подхода.

Литература

1. **Thomas J. Ford, Jason Hamilton.** A new positioning filter: phase smoothing in the position domain // Navigation: J. of The Institute of Navigation. – Vol. 50, N 2, Summer. – 2003. – P. 65–78.
2. **Graas F.V., Braasch M.** GPS interferometric attitude and heading determination: initial flight test results // Navigation: J. of The Institute of Navigation. – Vol. 38, N 4, Winter 1991–92. – P. 297–316.
3. Assessment of performance of ionospheric delay-free GPS carrier phase kinematic relative positioning with varying baseline lengths / **Cove K., Santos M., Huff L. et al.** // US Hydrographic Conf. (Biloxi, Miss, March 25–27, 2003). – 2003.

4. Кори Г., Кори Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – СПб.: Лань, 2003. – 831 с.
5. ОАО «РИРВ». – Режим доступа: <http://www.rirt.ru>.

Статья поступила
22 мая 2008 г.

Алексеев Валерий Евгеньевич – младший научный сотрудник НИИ вычислительных средств и систем управления МИЭТ. *Область научных интересов:* спутниковая навигация GPS/GLONASS, инерциальные навигационные системы.

Соловьев Александр Николаевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник ИППМ РАН (г. Москва). *Область научных интересов:* спутниковая навигация GPS/GLONASS, инерциальные навигационные системы.

Савченко Юрий Васильевич – главный конструктор НИИ вычислительных средств и систем управления МИЭТ. *Область научных интересов:* вычислительные комплексы, автоматизированные электронные системы.



Книжные новинки

У. Наундорф. Аналоговая электроника: основы, расчет, моделирование

Москва: Техносфера, 2008.

ISBN 978-5-94836-185-7



Знание основ аналоговой схемотехники является базой практически любой технической специальности.

В книге подробно рассмотрены основные электронные элементы и базовые схемы на них. Особое внимание уделяется нелинейным элементам, они анализируются посредством соответствующего приближения, затем их характеристики моделируются на компьютере для практического усвоения материала.

На CD записаны используемые в процессе изучения программы SPICE и GNU PLOT, а также документация и программы-примеры для систем LINUX и Windows.

Большое количество упражнений, возможность проверять расчеты посредством компьютерного моделирования, наглядность делают книгу прекрасным современным учебником, особенно полезным студентам первых курсов, изучающим электронику в технических университетах. Книга предназначена также инженерам-практикам, техникам и всем интересующимся электроникой и схемотехникой.

МЕТОДЫ И ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 539.293, 621.315.592

Локальное измерение электрооптических параметров кремниевых структур на основе фоторефрактивного эффекта

А.Л.Филатов, А.В.Герус, Е.М.Кораблев, А.В.Луговской

**Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
(Фрязинское отделение)**

На основе анализа исследований фоторефрактивного эффекта предложены новые методики локальных измерений коэффициента поглощения света на длине волны излучения накачки и коэффициента влияния концентрации неравновесных носителей заряда на коэффициент преломления света на длине волны зондирующего излучения. Теоретически и экспериментально исследованы особенности применения предложенных методик.

Фотоакустические методы разрабатывались для определения света в конденсированных слабо поглощающих средах [1]. В первых экспериментах использовалась газомикрофонная ячейка. Образец помещался в замкнутый, заполненный газом объем (газомикрофонную ячейку) и облучался промоделированным по интенсивности излучением. Поглощенная в образце энергия излучения приводила к смещению поверхности образца и нагреванию приповерхностного слоя газа. Это вызывало возникновение избыточного давления газа в ячейке, которое регистрировалось встроенным в ячейку микрофоном. Преимущества этих методов – высокая точность и возможность проводить бесконтактные, неразрушающие образцы измерения. Позже появились модификации фотоакустических методов [2, 3], позволяющие определять другие параметры конденсированных сред и использующие разные методы регистрации акустических волн, которые возникают в результате поглощения промодулированного по интенсивности света.

В работах [4, 5] предложен и развит новый фотоакустический метод, названный фоторефрактивным. Метод позволяет измерять время жизни и коэффициент диффузии неравновесных носителей заряда в полупроводниках. Дальнейшее исследование показало возможность применения этого метода для определения и других параметров полупроводников в результате локального, одновременного измерения в ходе одного эксперимента [7].

В настоящей работе рассматриваются проблемы применения фоторефрактивного метода для одновременного определения еще двух параметров кремниевых структур: коэффициента поглощения света на длине волны излучения накачки и зависимости коэффициента преломления среды от концентрации неравновесных носителей на длине волны зондирующего излучения.

Математическая модель фоторефрактивного эффекта предложена и экспериментально проверена в работе [4]. Из модели следует, что для проекции угла отклонения Θ , перпендикулярной лучу накачки, имеем следующее выражение:

$$\Theta_x(x, z) = \text{const} \exp(-\beta z) \left\{ \left[\alpha + \frac{\Omega_0}{\Omega_0 + i\Omega(1 - \Omega_0)} \right] \exp(-\mu_0 X) - \left[Q + \frac{\Omega_0}{\Omega_0 + i\Omega(1 - \Omega_0)} \right] \exp(-\eta_0 X) \right\}. \quad (1)$$

Здесь $\alpha = -\frac{\chi}{E_g D} \left(\frac{\partial n^{opt}}{\partial n} \right) \left(\frac{\partial n^{opt}}{\partial T} \right)^{-1}$; $\Omega_0 = \frac{\kappa}{D}$; $\Omega = \omega \tau$; $Q = \frac{h\nu - E_g}{\gamma E_g}$; $X = x/L_q$;

$\mu_0 = \sqrt{1 - i\Omega}$; $\eta_0 = \sqrt{-i\Omega/\Omega_0}$; x – расстояние между зондирующим лучом и лучом накачки; n – концентрация фотовозбужденных носителей заряда; n^{opt} – коэффициент преломления зондирующего излучения; T – температура образца; χ – коэффициент теплопроводности; E_g – ширина запрещенной зоны; γ – квантовый выход; $h\nu$ – энергия квантов излучения накачки; L_q – характерная длина диффузии носителей заряда.

Выражение (1) справедливо только при выполнении следующих условий: 1) радиус луча накачки r намного меньше, чем характерные длины диффузии носителей заряда $L_q = (D\tau)^{1/2}$ и тепла $L_{th} = \sqrt{2\kappa/\omega}$, где D – коэффициент амбиполярной диффузии, τ – время жизни носителей, κ – коэффициент температуропроводности, ω – частота модуляции интенсивности излучения; 2) исследуемая область находится на расстоянии z , большем, чем характерные длины L_q и L_{th} ; 3) обратный коэффициент поглощения излучения накачки $1/\beta$ превосходит все другие характерные длины.

Экспериментальная установка полностью соответствует описанной в статье [6]. На рис.1 показан ход лазерных лучей в образце. В качестве источника луча накачки использовался YAG-лазер с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм. Зондирующий луч генерировался HeNe-лазером с длиной волны $\lambda = 1,15$ мкм. Снимались зависимости амплитуды и фазы фоторефрактивного сигнала, пропорционального углу отклонения Θ_x , от расстояния между лучами x при постоянной частоте.

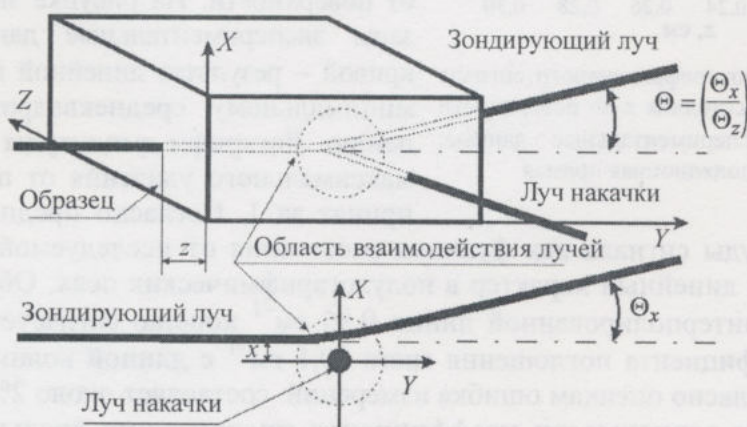


Рис.1. Схема прохождения лучей в фоторефрактивных экспериментах

Измерения коэффициента поглощения света. Из формулы (1) видно, что при фиксированном расстоянии между лучами и частоте модуляции интенсивности излучения накачки амплитуда фоторефрактивного сигнала вдали от поверхности изменяется как $\exp(-z\beta)$. Таким образом, проводя измерения на различных расстояниях от поверхности, имеем возможность определить коэффициент поглощения света на длине волны излучения накачки. При этом следует учесть, что так как удаление от поверхности эквивалентно эффективному уменьшению мощности излучения накачки и представленная формула была рассчитана для линейного по мощности фоторефрактивного эффекта, то предложенная методика измерений справедлива только в случае линейности сигнала от мощности. Такая линейность наблюдается не всегда. Механизмы, приводящие к нелинейности фотоакустического эффекта, были проанализированы в статье [7]. Главными из них являются изменения времени жизни носителей в зависимости от соотношения концентрации равновесных и неравновесных носителей и изменения коэффициента амбиполярной диффузии в зоне примерного равенства концентрации равновесных и неравновесных носителей. Тем не менее, практически в любом образце имеется возможность выбрать интервал изменения интенсивности в e раз, в котором фоторефрактивный эффект будет линейным. В данной работе ограничимся рассмотрением методики измерения коэффициента поглощения света в линейной области. Критерием нахождения в такой области является сохранение формы амплитуды и фазы фоторефрактивного сигнала при удалении от поверхности. За пределами линейной области также можно проводить измерения коэффициента поглощения, например с использованием критериев квазилинейного фоторефрактивного эффекта [7].

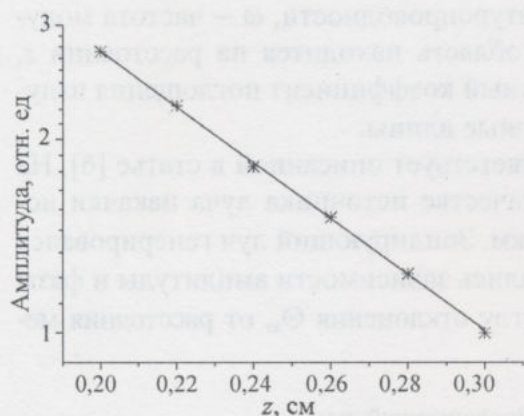


Рис.2. Амплитуда фоторефрактивного сигнала в зависимости от расстояния z до поверхности образца: * — экспериментальные данные; — интерполяционная прямая

В качестве иллюстрации предложенной методики на рис.2 представлена зависимость натурального логарифма амплитуды фоторефрактивного сигнала в относительных единицах от расстояния до поверхности образца. Измерения проводились при частоте модуляции излучения накачки 1850 Гц, расстоянии между лучами 0,06 см, мощности излучения накачки 0,9 Вт, на образце кремния с удельным сопротивлением 20 кОм·см, на расстояниях 0,2; 0,22; 0,24; 0,26; 0,28; 0,3 см от поверхности. На рисунке звездочками показаны экспериментальные данные, сплошной кривой — результат линейной интерполяции по минимальному среднеквадратичному отклонению. Логарифм амплитуды сигнала в точке максимального удаления от поверхности был принят за 1. Согласно предположению зависимость амплитуды сигнала как функция расстояния от исследуемой области до поверхности имеет линейный характер в полулогарифмических осях. Обратный коэффициент наклона интерполированной линии $9,95 \text{ см}^{-1}$ хорошо согласуется с известным значением коэффициента поглощения света $10,1 \text{ см}^{-1}$ с длиной волны $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$ в кремнии [8]. Согласно оценкам ошибка измерений составляет около 2%.

Определение зависимости коэффициента преломления среды от концентрации неравновесных носителей. Из формулы (1) видно, что в зависимости коэффициента преломления зондирующего излучения от концентрации неравновесных носителей $\partial n^{opt}/\partial n$ входит безразмерный коэффициент α вместе с коэффициентами, которые могут быть либо измерены в ходе эксперимента (D определяется по методике, изложенной

в [6]), либо являются табличными данными (при $T = 300$ К $E_g = 1,12$ эВ [9], $\partial n^{opt}/\partial T = 2,5 \cdot 10^{-4}$ К $^{-1}$ [10]). Коэффициент теплопроводности χ может быть взят из таблицы [10] или вычислен исходя из экспериментального [6] измерения коэффициента температуропроводности k по формуле $\chi = kC_p$ с учетом табличных данных [10] $\rho = 2,33$ г/м 3 , $C_p = 618,4$ Дж/(кг·К).

Таким образом, основной проблемой определения коэффициента $\partial n^{opt}/\partial n$ на базе фоторефрактивного эффекта является необходимость предварительного определения коэффициента амбиполярной диффузии при неизвестном коэффициенте α . Проведенный численный анализ и математическое моделирование формулы (1) показали, что на высоких частотах, когда характерная длина «электронной» компоненты сигнала $L_{eff} = \sqrt{2D\tau/(1 + \sqrt{1 + \Omega^2})}$ становится намного больше характерной длины его «тепловой» компоненты $L_{th} = \sqrt{2\kappa/\omega}$, коэффициент α слабо влияет на форму сигнала. На частотах модуляции интенсивности излучения накачки, когда эти характерные длины приблизительно равны, фаза фоторефрактивного сигнала начинает сильно зависеть от величины коэффициента α .

Экспериментальная проверка возможности определения коэффициента $\partial n^{opt}/\partial n$ фоторефрактивным методом выполнена на образцах кремния с удельным сопротивлением 20 кОм·см при мощности излучения накачки 0,9 Вт. На рис.3 приведены экспериментальные и теоретические зависимости фоторефрактивного сигнала от расстояния между лучами, полученные при двух частотах модуляции излучения накачки 10 и 1890 Гц. Расчет зависимостей для каждой из частот проводился для трех значений коэффициента $\alpha = 2,3; 3,3; 4,3$. Из графиков видно, что при частоте 1890 Гц, когда преобладает «электронная» компонента, расчетные кривые амплитуды и фазы фоторефрактивного сигнала совпадают для всех значений коэффициента α . Поэтому независимо от величины α из наклона фазовых и амплитудных графиков по методике, описанной в работе [6], имеется возможность определить коэффициент амбиполярной диффузии. В рассматриваемом эксперименте измеренная $D = 18$ см 2 /с. На частоте 10 Гц, когда наблюдается конкуренция «электронного» и «теплого» вкладов в сигнал, кривые, рассчитанные для различных значений коэффициента α , особенно сильно различаются в фазовых зависимостях. Поэтому для определения величины α необходимо сопоставлять экспериментальные и расчетные результаты именно на фазовых зависимостях. В рассматриваемом эксперименте $\alpha = 3,3$.

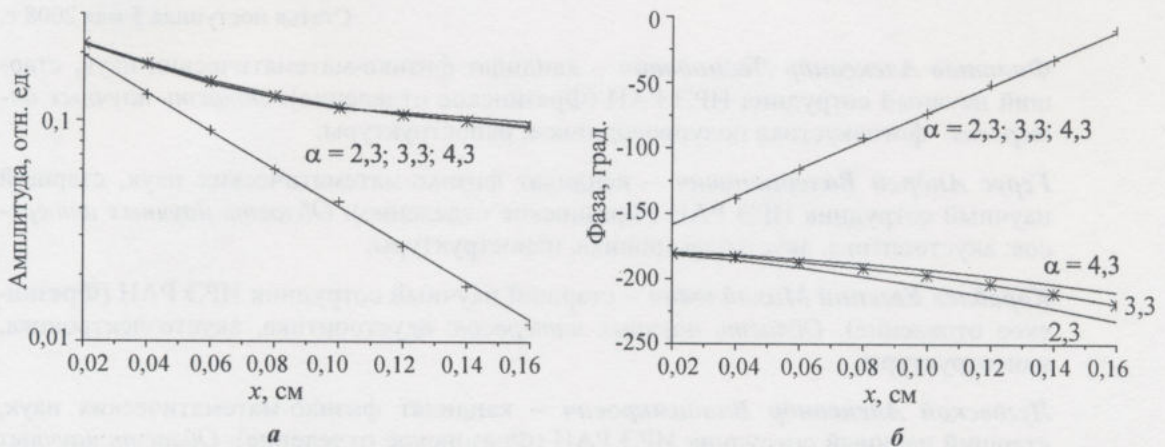


Рис.3. Зависимость амплитуды (а) и фазы (б) фоторефрактивного сигнала от расстояния между лучами: *, + – экспериментальные значения для частот 10 и 1890 Гц соответственно; — результаты расчета при трех значениях безразмерного параметра

Экспериментальная проверка предложенных методик определения коэффициента поглощения света на длине волны излучения накачки и величины зависимости коэффициента преломления среды от концентрации неравновесных носителей на длине волны зондирующего излучения показала хорошее количественное совпадение теоретических и экспериментальных результатов.

Главное преимущество новых фоторефрактивных методик состоит в локальности, бесконтактности и возможности определения искомых параметров в любой точке объема кремниевых структур. Информация о распределении измеряемых величин в образце важна по трем причинам. Во-первых, она повышает достоверность и уменьшает ошибку в определении времени жизни носителей заряда фоторефрактивным методом, так как при вычислении этого параметра можно использовать измеренные, а не табличные данные. Во-вторых, полученные данные дают прямую информацию, необходимую в качестве базовой в родственных фотоакустических методах [2]. В-третьих, измеренные величины характеризуют распределение других, связанных с ними параметров кремниевых структур, например уровня и вида легирования.

Литература

1. *Rosencwaig A.* Photoacoustics and photoacoustic spectroscopy. – N.Y.: Wiley, 1980. – 299 p.
2. *Fournier D., Boccara A.C., Skumanich A., Amer N.M.* Photothermal investigation of transport in semiconductors: theory and experiment // J. Appl. Phys. – 1986 – Vol. 59, N 3. – P. 787–795.
3. *Миргородский В.И., Орлова Г.А., Филатов А.Л.* Дистанционное зондирование температуропроводности твердых тел фототермодеформационным методом // ЖТФ. – 1992. – Т. 3. – Вып. 63. – С. 180–185.
4. *Filatov A.L., Sablicov V.A., Mirgorodsky V.I.* Photorefractive method of contactless determination of the charge carrier lifetime and diffusion coefficient in semiconductors // Semicond. Sci. Technol. – 1993. – Vol. 8. – P. 694–699.
5. *Филатов А.Л., Миргородский В.И., Сабликов В.А.* Фоторефрактивный метод бесконтактного зондирования рекомбинационных параметров полупроводников // ФТП. – 1993. – Т. 27. – Вып. 1. – С. 81–85.
6. *Филатов А.Л.* Квазилинейный фоторефрактивный эффект в кремнии // Физика и техника полупроводников. – 2000. – Т. 34. – Вып. 11. – С. 1322–1326.
7. *Филатов А.Л., Луговской А.В.* Особенности применения фоторефрактивного эффекта для комплексного трехмерного локального измерения электрофизических параметров кремниевых структур // Изв. вузов. Электроника. – 2008. – № 1. – С. 74–78.
8. *Jellison G.E., Jr. and Burke H.H.* The Temperature dependence of the refractive index of silicon at elevated temperatures at several laser wavelengths // J. of Appl. Phys. – Vol. 60, N 2. – P. 841–843.
9. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов: В 2 кн. Кн.1: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
10. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С.Григорьевой, Е.З.Мейлихова. – М.: Энергоиздат, 1991. – 1232 с.

Статья поступила 5 мая 2008 г.

Филатов Александр Леонидович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИРЭ РАН (Фрязинское отделение). *Область научных интересов:* фотоакустика полупроводников, наноструктуры.

Герус Андрей Валерианович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИРЭ РАН (Фрязинское отделение). *Область научных интересов:* акустооптика, акустоэлектроника, наноструктуры.

Кораблев Евгений Михайлович – старший научный сотрудник ИРЭ РАН (Фрязинское отделение). *Область научных интересов:* акустооптика, акустоэлектроника, наноструктуры.

Луговской Александр Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИРЭ РАН (Фрязинское отделение). *Область научных интересов:* фотоакустика, спиновые волны в магнетиках, дистанционное СВЧ-зондирование земной поверхности.

ПРОБЛЕМЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 004.416.6:004.051:004.055

Методика автоматизированной обработки зачетно-экзаменационных ведомостей в полнофункциональной ИУС «Деканат»

В.К.Григорьев, А.В.Грушин

**Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики
(технический университет)**

Рассмотрены проблемы компьютерной поддержки управления учебным процессом на примере авторской полнофункциональной информационно-управляющей системы «Деканат» МИРЭА. Выделен процесс выпуска и приема зачетно-экзаменационных ведомостей. Предлагается модель структуры ведомости и рассматривается методика распознавания оценок на основе штрихкодовой идентификации ведомостей. Приведены результаты экспериментального исследования методики распознавания.

Анализ результатов информатизации вузов показывает, что используемые системы недостаточно охватывают учебную деятельность вузов [1]. Необходимость учета особенностей вуза при автоматизации управления учебным процессом породила ряд работ в этой области [2, 3].

Одним из важнейших узлов управления учебным процессом является деканат, который должен отслеживать информационный поток «Студенты» и на его основе управлять переводом, отчислением студентов, начислением стипендии путем выпуска приказов различных типов, а также проводить мониторинг успеваемости путем выпуска и учета зачетно-экзаменационных ведомостей и индивидуальных направлений на экзамен (зачетно-экзаменационных листов). Поддержку всех информационных и управляющих процессов деканата осуществляет полнофункциональная информационно-управляющая система (ИУС) «Деканат» МИРЭА [4].

Полнофункциональная ИУС «Деканат» содержит пять логических слоев: база данных, интерфейсный слой взаимодействия между базой данных и системой, функциональные модули, которые через слой преобразования на основе разграничения полномочий организуют автоматизированные рабочие места пользователей. Система имеет двухуровневую клиент-серверную архитектуру «толстый клиент/сервер» (рис.1) и реализована инструментальными средствами Delphi7 и Interbase7.1. Система зарегистрирована в фонде алгоритмов и программ [5]. Наиболее критичным периодом работы деканата с точки зрения появления большого объема новой информации, принятия на ее основе управленческих решений является сессия (табл.1). В ИУС «Деканат» предложены и реализованы решения для компьютерной поддержки технологических процессов, составляющих сессию.

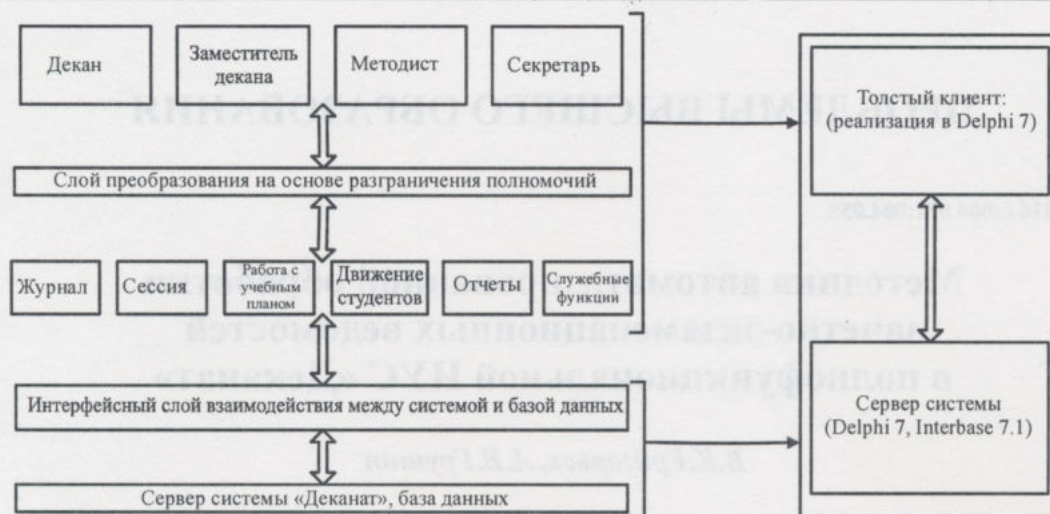


Рис. 1. Структурная схема ИУС «Деканат»

Таблица 1

Основные информационные потоки деканата

Название потока	Объем потока	Период
Приказ о зачислении	300 человек	Перед началом учебного года (10 дней)
Мониторинг успеваемости	$N_{\text{оценок}} = N_{\text{студентов}} \cdot (N_{\text{экзаменов}} + N_{\text{зачетов}} + N_{\text{перезэкзаменовок}})$ Около 1700 человек, 5 экзаменов, 10 зачетов, 0,4 перезэкзаменовки (более 27500 оценок)	Сессия (три недели)
Перевод с курса на курс	1700 человек	По окончании летней сессии (10 дней)
Отчисление в связи с окончанием	$250 \text{ человек} \cdot (\text{диплом} + \text{приложение}) = 500 \text{ печатных документов}$	После приказа об отчислении (10 дней)

Компоненты ИУС «Деканат», поддерживающие технологические процессы сессии. Выделим основные процессы, составляющие зачетно-экзаменационную сессию:

- выпуск большого числа зачетно-экзаменационных ведомостей для студентов, допущенных к сдаче экзаменов, выпуск ведомостей для перезэкзаменовок;
- регистрация оценок, проставленных в зачетно-экзаменационных ведомостях;
- прием студентов в деканате, анализ актуальной информации о студенте;
- выдача индивидуальных зачетно-экзаменационных листов для сдачи и пересдачи зачетов и экзаменов;
- регистрация оценок, проставленных в зачетно-экзаменационных листах.

В ИУС «Деканат» для поддержки процессов выпуска ведомостей и регистрации оценок с точки зрения их автоматизации используются следующие механизмы.

Модель зачетно-экзаменационной ведомости. Построим инфологическую модель зачетно-экзаменационной ведомости:

$$Mo = (\text{Header}, SL, RL, ES, EN), \quad (1)$$

где Header – заголовок зачетно-экзаменационной ведомости; SL – список студентов группы; RL – список оценок и дат их проставления (рукописный текст); ES – список подписей преподавателя (рукописный текст); EN – ФИО преподавателя (рукописный текст).

Из (1) видно, что все информационные поля заполняются преподавателем в виде рукописного текста и для выполнения автоматического ввода информации необходимо осуществлять его распознавание. Данное решение крайне сложно в реализации и обладает низкой надежностью. Для решения задачи распознавания оценок в зачетно-экзаменационной ведомости наиболее целесообразно введение дополнительных полей для простой фиксации оценки и маркировка ведомости штрих-кодом для создания ее эталона и установления соответствия между эталоном и выпускаемой ведомостью [6]. С этой целью в модель были введены поля для машинной обработки. Была построена новая инфологическая модель ведомости (рис.2), которая представляет собой расширение (1):

$$Md = (\text{Header}, \text{BC}, \text{SL}, \text{RL}, \text{RAL}, \text{ES}, \text{EN}, \text{KMD}, \text{KMM}), \quad (2)$$

где **BC** – штрих-код; **RAL** – поле оценок для машинной обработки; **KMD** – день проведения контрольного мероприятия (КМ), поле для машинной обработки; **KMM** – месяц проведения КМ, поле для машинной обработки.

Опорные метки:

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ,
ЭЛЕКТРОНИКИ И АВТОМАТИКИ (ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Header

ЗАЧЕТНО-ЭКЗАМЕНАЦИОННАЯ ВЕДОМОСТЬ

по дисциплине Математический анализ (Экзамен)

факультет ВМС группа ВБ-1-06

2007/2008 уч. год 3 семестр Экзаменатор:

BC

EN

№	Ф.И.О. студента	Шифр	Дата	Оценка	для машинной обработки						Подпись экзаменатора
					н.я.	зач	неуд	уд	хор	отл	
1	Валиев Т.С.	061001	19.10.07	хорошо						✓	
2	Дормаков Е.Н.	061003	19.10.07	отлично						✓	
3	Дорожкина А.В.	061004	19.10.07	отлично						✓	

SL

RL

Экзаменатор

RAL

ES

Дата зачета / экзамена:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
																			×											

Декан

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
											×

KMM

KMD

Опорные метки:

Рис.2. Модифицированная форма ведомости с обозначением полей модели Md

Структура новых элементов модели (2) содержит следующие элементы.

Штрихкод – предназначен для автоматической идентификации зачетно-экзаменационных ведомостей при приеме. Наносится на ведомости при печати.

Поле оценок для машинной обработки – представляет собой матрицу размерности [SL,6]. Каждый элемент может принимать одно и только одно значение из набора: не-явка, зачет, незачет/неуд, удовлетворительно, хорошо, отлично.

Дата проведения контрольного мероприятия (день и месяц проведения КМ) – представляет собой два вектора размерности [31] и [12] соответственно. Заполненным должно быть одно и только одно значение в каждом из векторов.

На основе (2) была модифицирована структура базы данных (БД) системы по работе с зачетно-экзаменационными ведомостями (рис.3). В БД были добавлены две таблицы: «Активные ведомости» и «Список студентов ведомости». В первой таблице сохраняется ссылка на проводимое КМ (ID контрольного мероприятия, где содержится

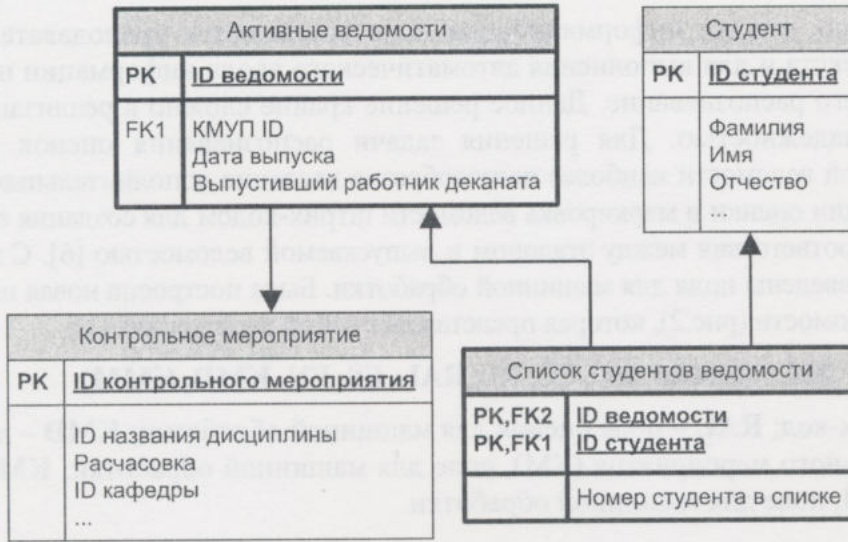


Рис.3. Фрагмент БД по работе с ведомостями

ссылка на номер семестра). Ключ «ID ведомости» из таблицы «Активные ведомости» заносится в штрихкод выпускаемой ведомости и используется для ее идентификации при сканировании. Таблица «Список студентов ведомости» содержит ссылки на студентов ведомости, включая порядковый номер каждого студента в списке. Данные из таблицы «Список студентов ведомости» используются для установления соответствия между распознанной оценкой ведомости и конкретным студентом группы.

В системе «Деканат» работа с зачетно-экзаменационными ведомостями разделена на этапы в следующей последовательности: 1) выпуск ведомостей; 2) заполнение ведомостей преподавателями; 3) сканирование ведомостей, распознавание оценок; 4) контроль и сохранение результатов. При выпуске ведомости происходит печать и сохранение информации о ней в БД (рис.4, А3). В описанные выше таблицы БД заносятся данные о КМ и списочном составе, а на лист ведомости впечатываются поля Header, BC и SL.

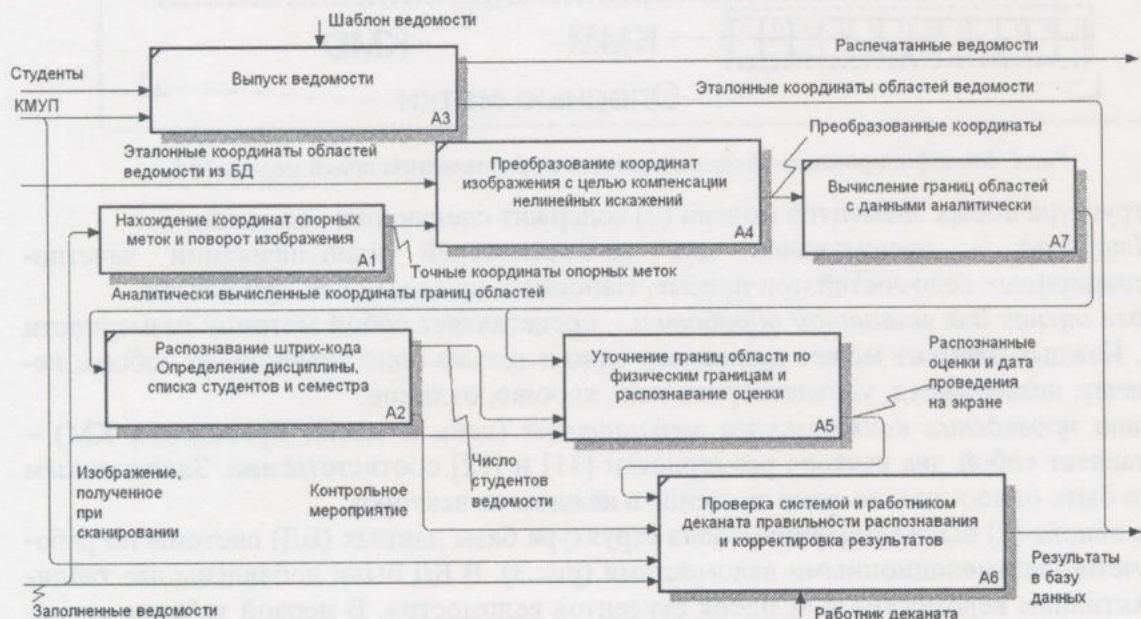


Рис.4. Функциональная модель ИУС «Деканат» по работе с ведомостями

При заполнении ведомостей преподаватель помимо заполнения стандартных полей RL, ES, EN заполняет также поля для машинной обработки RAL, KMD и KMM (см. рис.2).

Ввод оценок из зачетно-экзаменационных ведомостей в БД системы «Деканат» производится сканированием и последующим автоматическим распознаванием (см. рис.4). По окончании процесса распознавания на экране появляется вся информация по ведомости: список студентов группы, оценки, дата проведения КМ (рис.5).

					н.я.	зач.	неуд.	уд.	хор.	отл.
1	Горюшкин А.В.	071002								✓
2	Гуреев В.М.	071004								
3	Гусаров Г.А.	071326							✓	
4	Денисов С.В.	071005							✓	
5	Дукаревич А.Г.	071006						✓	✓	
6	Львов И.Э.	071237								
7	Метелкин С.А.	071010							✓	
8	Минаев В.С.	071011								✓
9	Осокин Д.В.	071012								✓
10	Семичев И.Д.	071015								
11	Терентьев Ф.А.	071238				✓		✓		
12	Чистяков П.С.	071017					✓			

а

б

Рис. 5. Печатный вариант ведомости (а), интерфейс приема ведомостей (б)

Распознавание зачетно-экзаменационных ведомостей. Алгоритм распознавания ИУС «Деканат» МИРЭА построен на основе экстенционального метода «голосования», который сводится к математическому расчету координат информационных областей с последующей коррекцией по реальным границам областей. Для определения априорных координат информационных полей используется принцип расчета по четырем опорным меткам, расположенным по углам листа (см. рис.2).

Распознавание зачетно-экзаменационной ведомости начинается с определения координат опорных меток (рис.4, А1). Для надежного поиска опорных меток применен «рекурсивный алгоритм заполнения с затравкой» и последующий сравнительный анализ найденных областей с критериями эталонной опорной метки. Принцип его работы состоит в следующем: на основе фрагмента изображения, где производится поиск опорной метки, строится двумерный массив элементов типа boolean. Черная точка отображается как «Истина», белая – как «Ложь». Поиск проводится построчно, начиная сверху, слева направо. Ищем первый попавшийся элемент «Истина». Как только этот элемент найден, включается алгоритм заполнения, который рекурсивным образом «за-

ливает» найденную и все прилегающие к ней элементы «Истина» значением «Ложь». Во время заполнения вычисляются следующие значения найденной связной области: длина, ширина, X и Y описывающего ее прямоугольника, а также вес данной области (число элементов «Истина»). После окончания работы алгоритма поиска получаем массив связных областей, из которого по заданному критерию выбираем координаты искомой опорной метки. Как показали результаты экспериментальных исследований, параметры описывающего прямоугольника и вес дают возможность устойчивой идентификации опорных меток и отделение их от других надписей ведомости. Преимущество алгоритма поиска, в частности, состоит в том, что посторонние записи на ведомости не оказывают влияния на точность нахождения положения опорных меток. Отметим, что эти записи не должны «наезжать» на опорные метки, т.е. не должны иметь с ними общих и примыкающих точек.

После нахождения опорных меток выполняется процедура определения центра изображения и производится поворот относительно него на средний угол, вычисленный по координатам меток по формуле

$$\varphi = \frac{(a+b+c+d)}{4},$$

где a, b, c, d – углы между прямыми, проведенными через опорные метки и соответствующими осями (рис.6,а).

Далее выполняется корректировка линейных искажений изображения ведомости, которые появляются как при печати, так и во время сканирования.

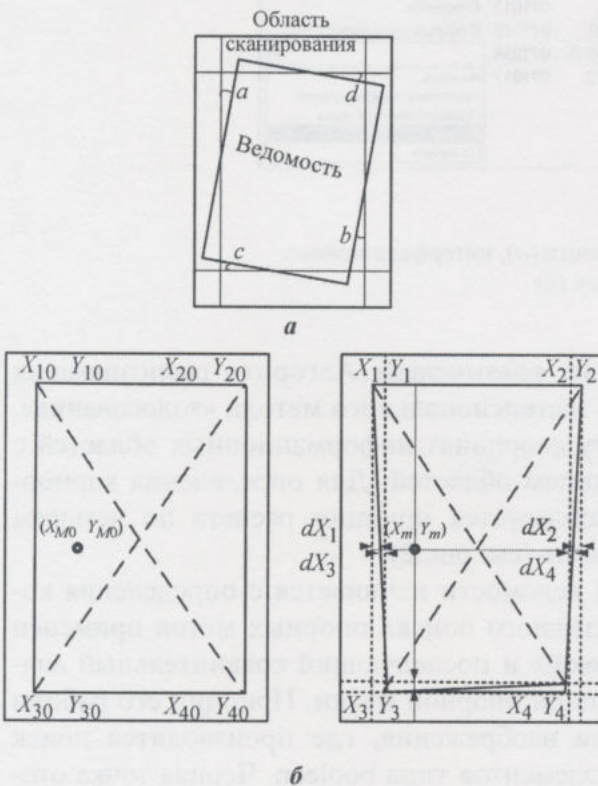


Рис.6. Линейные преобразования отсканированного изображения ведомости: а – поворот изображения; б – компенсация линейных искажений

Пусть X_1, X_2, X_3, X_4 – найденная координата X опорной метки соответствующего номера; Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 – найденная координата Y опорной метки соответствующего номера; (X_{m0}, Y_{m0}) – координата искомой точки на эталоне; dX_L, dX_R – значение коэффициентов деформации по левой и правой стороне изображения; dY_T, dY_B – значение коэффициентов деформации по верхней и нижней стороне изображения.

Определяем коэффициенты деформации ведомости:

$$\begin{aligned} dX_L &= ((X_3 - X_1) / (Y_1 - Y_3)) \cdot Y_{m0}, \\ dX_R &= ((X_4 - X_2) / (Y_4 - Y_2)) \cdot Y_{m0}, \\ dY_T &= ((Y_2 - Y_1) / (X_2 - X_1)) \cdot X_{m0}, \\ dY_B &= ((Y_4 - Y_3) / (X_4 - X_3)) \cdot X_{m0}. \end{aligned} \quad (3)$$

Исходя из (3) получаем общие коэффициенты

$$\begin{aligned} dx &= dX_L \cdot (X_2 - X_{m0}) + dX_R \cdot (X_{m0} - X_1), \\ dy &= dY_T \cdot (Y_4 - Y_{m0}) + dY_B \cdot (Y_{m0} - Y_2). \end{aligned} \quad (4)$$

Отсюда получаем формулу преобразования координат эталонной ведомости в координаты информационных полей отсканированного изображения (рис.6,б):

$$X_m = X_{m0} + dx, Y_m = Y_{m0} + dy \quad (5)$$

Можно рассматривать искажения по вертикали и горизонтали (5) независимо, так как погрешность их влияния друг на друга имеет более высокий порядок малости.

Далее распознается штрихкод (см. рис.4, A2). Считывание штрихкода в стандарте Code128C происходит из общего отсканированного изображения ведомости. Наличие в штрихкоде контрольной свертки делает идентификацию с помощью штрихкодов очень удобной и надежной (99,97%). Распознавание штрихкода реализуется в соответствии с описанием стандарта [7] в несколько итераций:

1) для считывания штрихкода проводится сканирующая прямая через область штрихкода;

2) в случае успешного распознавания штрихкода значение возвращается;

3) в случае возникновения ошибки при распознавании проводится сканирующая прямая через соседнее место штрихкода со смещением на несколько точек;

4) при повторении ошибки (п. 3) 25 раз (определяется высотой штрихкода на ведомости) возвращается сообщение о невозможности чтения штрихкода.

При исследовании работы алгоритма распознавания оценок в зачетно-экзаменационных ведомостях в ходе экспериментов выяснилось, что существуют такие нелинейные искажения бланка зачетно-экзаменационной ведомости при печати, при которых вычисленные аналитически области сильно смещены относительно реальных, несмотря на правильно определенные координаты опорных меток. Это происходит, например, при дефекте в протяжном устройстве принтера, когда в одной части изображение сжато, а в другой растянуто. Поэтому было добавлено уточнение вычисленных априорных координат по изображениям границ областей путем голосования (см. рис.4, A5). Принцип его заключается в следующем: вместе с аналитически рассчитанной областью задается область погрешности, внутри которой путем анализа изображения проводится поиск реальной границы области. Если граница найдена в заданной области, уточняется ее значение, если нет – координата остается рассчитанной аналитически. На рис.7 показана ситуация, где в четырех случаях из пяти проводится уточнение по реальным границам информационной области оценок и в одном случае из двух координат выбирается аналитически рассчитанная (4-й пик на графике), так как уточненная координата выходит за пределы погрешности вычисленной координаты. Происходит это из-за присутствия посторонних записей в области полей для машинной обработки, которые мешают правильной коррекции.

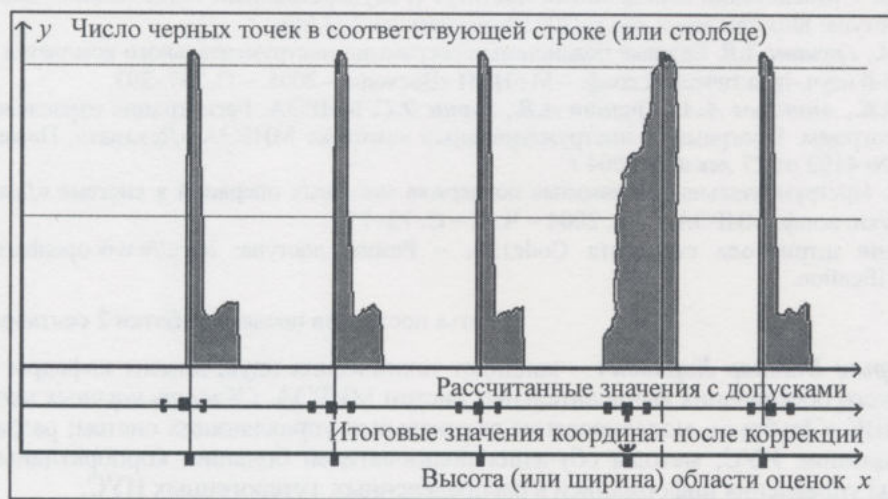


Рис.7. Уточнение аналитически рассчитанных границ информационных областей ведомости для компенсации нелинейных искажений

После того как все информационные области найдены, проводится расчет мощности множества черных точек в каждой из них и сравнение с критериями эталонной ведомости. Порог чувствительности установлен на уровне 5% от общего числа точек области. Заполнение на меньшую величину воспринимается как шум и игнорируется. После установления заполненных областей проводятся сравнения с критериями, установленными в модели (2), «сборка» даты по дню и месяцу и результаты выводятся на экран пользователя.

Результаты работы системы распознавания оценок в зачетно-экзаменационных ведомостях за летнюю сессию 2006/2007 учебного года представлены в табл.2.

Таблица 2

Результаты работы подсистемы распознавания оценок

Деканат	Зачетно-экзаменационные ведомости			
	Всего принято	Общее число ошибок	Неправильное заполнение ведомостей	Ошибки распознавания
ВМС	1401	98 (7%)	87 (6,2%)	11 (0,8%)
Кибернетика	776	50 (6,4%)	44 (5,64%)	6 (0,76%)
РТС	2206	190 (8,5%)	169 (7,55%)	21 (0,95%)

Анализ ошибок, возникающих при приеме ведомостей, показал, что наибольшее количество ошибок появляется вследствие неправильного заполнения ведомостей (незаполненные поля, заполнение более одной позиции в строке, посторонние записи в областях для машинной обработки). Среди ошибок распознавания наиболее частой ошибкой является определение менее четырех опорных меток вследствие неровного положения ведомости в сканере таким образом, что часть ее оказывается вне области сканирования.

Литература

1. *Голосов А., Полотнюк И.* Реформа образования и информатизация в вузах // Открытые системы. – № 1. – 2007. – Режим доступа: www.osp.ru/os/2007/01/3999187/p2.html.
2. *Стасышин В.М.* Информатизация учебного процесса и система «Деканат» // ТУ ИНФОРМ. – 2005. – № 2 (139). – Режим доступа: <http://inform.nstu.ru/index.php?type=inform&statat=228>.
3. *Горелик Е.П., Петров А.О., Рубцов Е.Б.* Система АСУ «Деканат» для автоматизации управления учебным процессом. – Московский авиационный институт (Государственный технический университет) Россия. – Режим доступа: <http://nit.miem.edu.ru/2003/tezisy/articles/323.htm>.
4. *Антонов А.А., Грушин А.В.* Базовые подсистемы программно-инструментального комплекса МИРЭА «Деканат» // Сб. тр. 5-й науч.-практической конф. – М.: НИИ «Восход». – 2005. – С. 287–293.
5. *Григорьев В.К., Антонов А.А., Грушин А.В., Зорин Д.С.* МИРЭА. Регистрация отраслевого фонда алгоритмов и программ. Программно-инструментальный комплекс МИРЭА «Деканат». Номер отраслевой регистрации № 4192 от 27 декабря 2004 г.
6. *Грушин А.В.* Инструментально-программная поддержка массовых операций в системе «Деканат» // Сб. тр. 53-й науч.-техн. конф. МИРЭА. – М., 2004 – Ч. 4. – С. 72–77.
7. Спецификация штрихкода стандарта Code128. – Режим доступа: http://www.openbarcode.org/wiki/Code_128_specification.

Статья поступила после доработки 2 сентября 2008 г.

Григорьев Виктор Карлович – кандидат технических наук, доцент кафедры математического обеспечения вычислительных систем МИРЭА. *Область научных интересов:* ОС МВК «Эльбрус», моделирование специальных управляющих систем; разработка и исследование ИУС; методы обучения пользователей больших корпоративных ИУС, методы управления информацией в распределенных гетерогенных ИУС.

Грушин Алексей Валерьевич – аспирант кафедры математического обеспечения вычислительных систем МИРЭА. *Область научных интересов:* компьютерное распознавание образов, построение моделей учебно-научной деятельности вуза.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.373.5

Полосно-пропускающие фильтры на диэлектрических резонаторах с высокой проницаемостью

А.Г.Ефимов

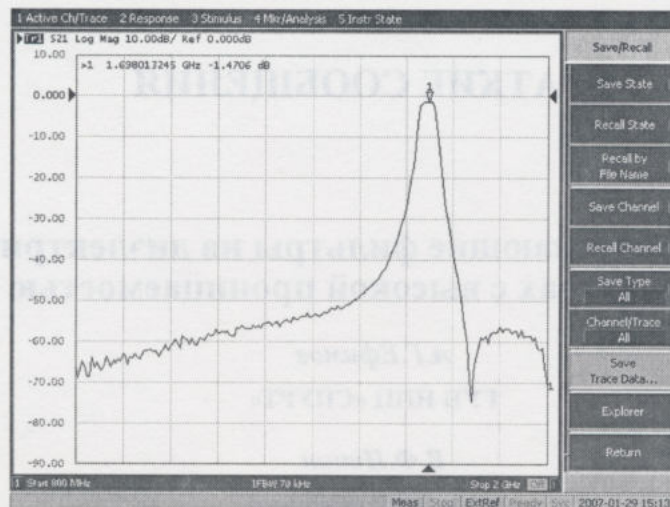
ГУП НПЦ «СПУРТ»

В.Ф.Панин

ГУП НПП «Оптэкс»

Одним из вариантов уменьшения размеров микроэлектронных устройств СВЧ-диапазона является использование материалов с высокой диэлектрической проницаемостью. Наиболее распространено использование резонаторов с высокой диэлектрической проницаемостью в полосно-пропускающих фильтрах [1, 2]. Основными требованиями к керамическим материалам диэлектрических резонаторов являются повышение добротности и близкий к нулю температурный коэффициент диэлектрической проницаемости. Совершенствование технологии изготовления диэлектрических резонаторов с высокой диэлектрической проницаемостью на основе твердых растворов ряда соединений, начатое в НИИ «Гириконд», продолжается в ООО «Керамика» (г. Санкт-Петербург). Проведенные работы показали возможность получения температурного коэффициента частоты требуемого знака и величины от $-6,0$ до $+15,0$ MK^{-1} для резонаторов с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 80$ в интервале температур от -60 до $+80$ $^{\circ}\text{C}$ [3]. Была установлена зависимость резонансной частоты от условий возбуждения резонатора, что позволило определить точные геометрические размеры и сократить трудоемкость регулировки фильтров при изготовлении приемных модулей в условиях серийного производства. Отказ от механической перестройки с помощью винтов, выбор оптимального числа резонаторов и конструкция фильтра с использованием пенополиуретановой подложки достаточно четко обоснованы в работе [4].

Наибольшее распространение получили фильтры на диэлектрических резонаторах из материала ТБНС с $\epsilon = 80$. Для отбора резонаторов с нужной резонансной частотой и исследования диэлектрических резонаторов используется контактирующее устройство (КУ). В настоящей работе для реализации фильтров были выбраны резонаторы с $\epsilon = 80$, изготовленные по современной технологии [5]. Для каждого частотного диапазона экспериментально определены оптимальные размеры отсека фильтра, представляющего собой экранированный металлический корпус с опаиваемой крышкой. Оптимизация геометрических размеров отсека фильтра позволяет сократить паразитные полосы пропускания. Ширина отсека выбрана в полтора диаметра резонатора, а высота – в два раза больше высоты резонатора. Конструкция фильтров максимально повторяет конструкцию КУ, что обеспечивает повторяемость характеристик. Сигнал в отсек фильтра подается через коаксиальный металло-стеклянный переход, на который напаивается возбуждающий штырь. Для сохранения добротности резонатора при установке в корпус используется подложка из пенополиуретана толщиной не менее 2 мм с диэлектрической проницаемостью близкой к единице, технологический отжиг обеспечивает стабильность подложки в диапазоне температур и при воздействии влаги. Крепление резонаторов к подложкам и подложек к корпусу осуществляется клеем ВК-9, обеспечивающим минимальный вклад в искажение характеристик фильтров. Полосно-пропускающие фильтры на диэлектрических резонаторах обеспечивают прямые потери не более 1,5 дБ при рабочей полосе не более 2% и запырании более 40 дБ при отстройке на 200 МГц. Типовая амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) полосно-пропускающего фильтра на трех диэлектрических резонаторах представлена на рисунке. Неравномерность характеристики в полосе пропускания не превышает 0,5 дБ.



АЧХ полосно-пропускающего фильтра на трех диэлектрических резонаторах

Проведенные испытания показали устойчивость данного типа фильтров к воздействию механических ударов многократного действия с пиковым ускорением 15g и стабильность характеристик в рабочем диапазоне температур от -50 до $+65$ °C. Суммарное изменение АЧХ в указанном диапазоне температур не превышает 2 МГц.

Использование диэлектрических резонаторов с высокой диэлектрической проницаемостью и высокой термостабильностью, изготовленных по современной технологии, позволяет реализовать малогабаритные полосно-пропускающие фильтры для систем космической связи. Наиболее эффективно использование подобных полосно-пропускающих фильтров для защиты приемных трактов в сложной электромагнитной обстановке, подавления внеполосных излучений на выходе передающих трактов и при выделении информационной полосы в повышающих преобразователях частоты с низкой промежуточной частотой.

Литература

1. Диэлектрические резонаторы в микроволновой СВЧ (обзор) / Ю.М.Безбородов, Л.Г.Гассанов, А.А.Липатов и др. // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1981. – Вып. 4(768). – С. 3–82.
2. Безбородов Ю.М., Нарытник Т.Н., Федоров В.Б. Фильтры СВЧ на диэлектрических резонаторах. – Киев: Техника, 1989. – 184 с.
3. Термостабильные керамические материалы для высокочастотных диэлектрических резонаторов микроволнового применения / Е.А.Ненашева, Л.П.Мудролюбова, И.В.Масловская и др. // Научно-технические достижения: Межотраслевой науч.-техн. сб.: М.: ВНИИМИ 1, 1991. – С. 28–30.
4. Варфоломеев И.Н., Дмитриев С.Д., Панин В.Ф. Вопросы микроминиатюризации диэлектрических фильтров // Электронная техника. Сер.10. Микроволновые устройства. – 1977. – Вып. 5. – С. 39–42.
5. Ненашева Е.А. Состояние дел в области разработок и производства микроволновых керамических материалов и элементов СВЧ-техники // Материалы конф. «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем». – Омск, 2006. – С. 189–195.

Поступило
23 сентября 2008 г.

Ефимов Андрей Геннадьевич – кандидат технических наук, начальник отдела ГУП НПП «Спурт». Область научных интересов: проектирование микроволновой аппаратуры СВЧ-диапазона на основе арсенид-галлиевых интегральных схем и дискретных элементов для поверхностного монтажа.

Панин Владимир Федорович – кандидат технических наук, главный специалист ГУП НПП «Оптэкс». Область научных интересов: проектирование наземных комплексов приема информации с космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.

Телеметрическая система сбора и регистрации данных макета спускаемого аппарата космического аппарата «Фобос-Грунт» для обеспечения полигонных испытаний

В.П.Бец, А.В.Ковтонюк

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

А.В.Кантор, А.В.Невзоров, А.Е. Ширшаков

ФГУП «НПО им. С.А.Лавочкина» (г. Химки)

Теоретические аспекты оценки траектории спуска подробно описаны в [1], однако с практической точки зрения большой интерес представляют значения параметров, полученные в результате моделирования [2] и натурных испытаний. С целью определения параметров траектории спуска и подхода к земной поверхности спускаемого аппарата (СА) космического аппарата «Фобос-Грунт», а также определения коэффициента демпфирующего момента аппаратного отсека в НПО им. С.А.Лавочкина проводятся полигонные (бросковые) испытания макета СА в авиационно-техническом центре «Алферьево» (этап 1) и на полигоне посадки «Сары-Шаган», республика Казахстан (этап 2). Кроме того, в процессе проведения бросковых испытаний отрабатывается (испытывается) система поиска и обнаружения СА с помощью средств СА и полигона.

Для проведения испытаний макет СА поднимается на высоту от 2000 до 10000 м, где производится включение и проверка работоспособности телеметрической системы (ТМС), после чего осуществляется отделение макета СА от носителя (момент времени t_0). Циклограмма эксперимента (бросковых испытаний макета СА) представлена в таблице. После падения макета СА на землю (момент времени t_1) происходит определение и поиск точки посадки макета СА средствами полигона.

Циклограмма эксперимента

Событие	Текущее время, мин
Подъем макета СА на заданную высоту.	От 0 до $t_0 - 1$
Включение ТМС макета СА с блоком GPS, проверка работоспособности	$t_0 - 1$
Отделение макета СА от носителя	t_0
Соударение макета СА с земной поверхностью	От $t_0 + 1$ до $t_0 + 5$
Определение точки посадки, поиск и обнаружение макета СА	$t_1 + 120$
Обработка результатов эксперимента	—

Измерения и сохранение параметров траектории на этапах 1 и 2 выполняются ТМС макета СА для последующего воспроизведения и обработки, и определяется коэффициент демпфирующего момента аппаратного отсека.

На этапе 2 осуществляется сравнение параметров траектории спуска СА, полученных при проведении радиолокационных измерений, с параметрами, записанными ТМС на борту СА, и уточняется значение коэффициента демпфирующего момента СА.

Перечислим основные технические характеристики ТМС макета СА:

- вес ТМС макета СА с собственным источником электропитания не должен превышать 350 г. ТМС макета СА с источником электропитания размещается в агрегатном отсеке макета СА;
- ТМС макета СА обеспечивает сбор и запоминание следующих параметров: составляющих перегрузки по осям X , Y и Z в диапазонах от 0 до $2g$ (траектория спуска и подхода к земной поверхности) и от 0 до $3000g$ (соударение с земной поверхностью), составляющих векторов угловой скорости

вокруг осей X , Y и Z до ± 300 град/с, атмосферного давления от $1,5 \cdot 10^2$ до $1,013 \cdot 10^5$ Па, температуры атмосферы до ± 50 °С, текущих координат макета СА, определенных с помощью GPS-приемника;

- частота определения составляющих перегрузки в момент соударения с земной поверхностью составляет 3000 Гц, во время свободного падения – 100 Гц;

- погрешность измерения параметров не должна превышать 5% максимального значения.

Отметим некоторые особенности реализации ТМС. Исходя из обеспечения необходимого диапазона, точности измерений [1] и габаритно-весовых характеристик были выбраны следующие датчики:

- трехосевой микромеханический акселерометр MMA7260Q (Freescale Semiconductors) для измерения ускорений в диапазоне $\pm 2g$;

- датчики угловой скорости ADXRS300 (Analog Devices) для измерения угловых скоростей;

- трехкомпонентный вибропреобразователь AP38 (зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений) для измерения ускорений в диапазоне $\pm 3000g$;

- датчик температуры TMP100 (Texas Instruments) и датчик атмосферного давления MPXH6115 (Freescale Semiconductors) для измерения параметров атмосферы.

Для определения текущих координат макета СА используется GPS-приемник LEA-4H (uBlox).

Для уменьшения случайной ошибки отсчеты подвергаются усреднению, запись показаний каждого типа датчиков происходит в свою, независимую от других, flash-память. Вместе с результатами измерения в каждую flash-память записывается номер текущего измерения для последующей синхронизации. При записи данных GPS используется значение времени, полученное со спутников, что позволяет при обработке результатов эксперимента определить точное время каждого измерения.

Основная обработка результатов измерений, их коррекция с помощью калибровочных характеристик осуществляется на земле с помощью контрольно-проверочной аппаратуры (КПА), выполненной на базе персонального компьютера. Специально разработанное программное обеспечение позволяет считывать и отображать информацию из ТМС в виде графиков на экране, проводить проверку функционирования ТМС и при необходимости калибровать и вносить поправки в показания датчиков (например, учитывать влияние температуры на показания датчиков). Вся накопленная информация сохраняется в КПА в базе данных, что позволяет ее просматривать и обрабатывать в дальнейшем в автономном режиме.

Литература

1. *Петросян Л.В.* Математическая модель динамики спускаемого аппарата в атмосфере планеты // Тез. докл. Междунар. космической конференции «Космос без оружия – арена международного сотрудничества в XXI веке» (Москва, 2001). – М.: Машиностроение, 2001. – С. 62.

2. *Петросян Л.В.* Моделирование посадки на поверхность планеты аппарата с посадочным устройством рычажного типа // Полет. – 2002. – № 12. – С. 29 – 34.

Поступило 22 сентября 2008 г.

Бец Владимир Пантелеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры микрорелектронных радиотехнических устройств и систем МИЭТ, старший научный сотрудник НИИ ВС и СУ МИЭТ. *Область научных интересов:* цифровая обработка сигналов в реальном масштабе времени.

Ковтонюк Александр Владимирович – инженер-электроник НИИ ВС и СУ МИЭТ. *Область научных интересов:* системы цифровой обработки информации в реальном масштабе времени.

Кантор Александр Васильевич – кандидат технических наук, ведущий специалист ФГУП НПО им.С.А.Лавочкина (г. Химки). *Область научных интересов:* информационно-измерительные системы.

Незоров Александр Викторович – начальник отдела ФГУП НПО им.С.А.Лавочкина (г. Химки). *Область научных интересов:* информационно-измерительные системы.

Шириаков Александр Евгеньевич – кандидат технических наук, директор Центра бортовых систем и наземных комплексов ФГУП НПО им.С.А.Лавочкина (г. Химки). *Область научных интересов:* информационно-измерительные системы, бортовые и наземные радиотехнические системы.

Программный комплекс для систем дифрактометрического контроля и измерения геометрических параметров элементов топологии ИМС

С.Б.Беневоленский, Н.Л.Истомина, А.А.Смирнова, М.В.Спыну

«МАТИ» – Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского

Непрерывное уменьшение геометрических размеров элементов топологии (ЭТ) интегральных микросхем и изделий микромеханики привело к тому, что характерные размеры ЭТ находятся в субмикро- и нанодиапазоне [1–3]. Создание технологической базы и методов формирования поверхности с таким высоким разрешением требует совершенствования метрологической базы, используемой в системах управления для контроля и измерения геометрических размеров ЭТ. В дифрактометрических системах измерения основным достоинством является привязка к эталону длины. В качестве эталона выступает длина волны зондирующего излучения. Измерение геометрических параметров ЭТ в дифрактометрических системах осуществляется путем сравнения экспериментальной функции углового распределения интенсивности отраженного от периодической тест-структуры зондирующего монохроматического излучения с расчетными данными, получаемыми на этапе модельного анализа с использованием математического описания объекта измерения.

В настоящей работе описано программное обеспечение, позволяющее автоматизировать функции получения расчетных данных по дифракции зондирующего излучения, формирования базы данных с расчетными значениями и использования этих данных в системах измерений.

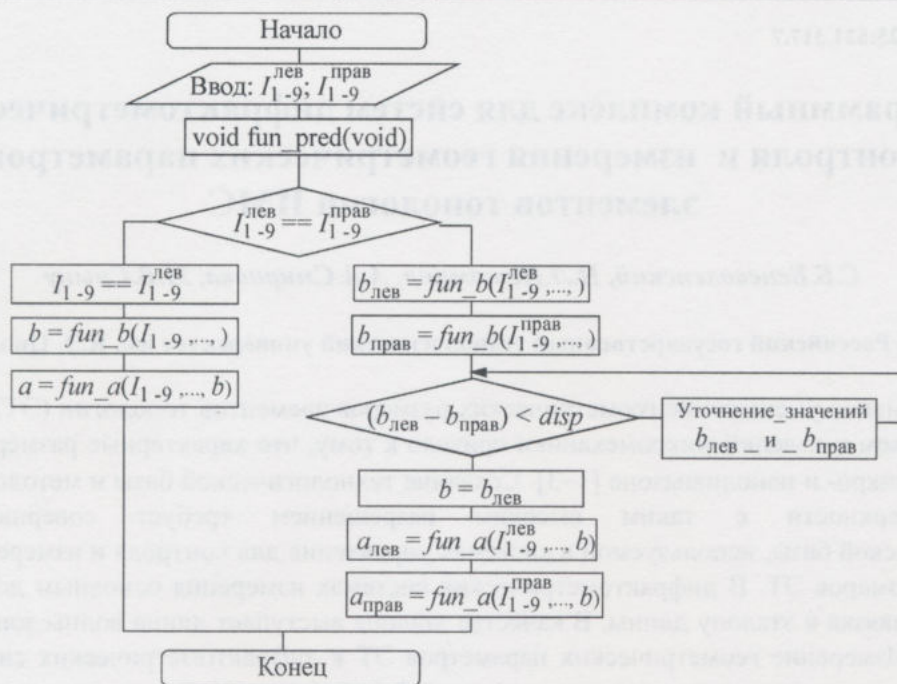
Программный комплекс разработан с использованием среды программирования C++. Он включает в себя основной программный модуль, в котором проводятся расчеты на основе закладываемой в него математической модели, модуль, содержащий синтезируемый программным комплексом банк данных параметров виртуальных тест-структур, вспомогательную поисковую систему, а также комплекс процедур для визуализации полученных результатов.

Основной программный модуль реализует алгоритм, представленный на рисунке. В данном модуле осуществляется расчет интенсивности дифракционных спектров и синтез спектров, имитирующих образ реального тест-объекта. Геометрические характеристики рабочего образца находятся по экспериментальным значениям отраженного от него спектра дифрагировавшего когерентного монохроматического излучения. В качестве математической основы для проведения расчетов используется функция углового распределения интенсивности дифрагирующего излучения плоской монохроматической волны единичной амплитуды на ЭТ трапециевидного профиля [4].

В модуле банка данных осуществляется запись параметров, рассчитанных в основном модуле. Полученные данные подвергаются дальнейшей сортировке для удобства работы с ними.

В вспомогательном поисковом модуле происходит оценивание каждой интенсивности I_n согласно принятой шкале оценок и из всего массива синтезированных спектров выбираются те, которые имеют наибольшее соответствие с экспериментальным дифракционным спектром. На основе полученной выборки определяются искомые параметры исследуемого образца.

В модуле визуализации с помощью компьютерного моделирования были синтезированы виртуальные объекты, позволяющие изучать особенности дифракции на непрозрачных тест-структурах с трапециевидной топологией и разными коэффициентами отражения.



Укрупненная схема работы функции определения геометрических параметров

Применение разработанного программного комплекса в различных областях промышленности, в частности в микро- и нанoeлектронике, прецизионном машиностроении и медицинской технике, как показывают предварительные оценки, должно привести к увеличению выхода годных изделий при калибровке измерительных оптических микроскопов в 1,5–2,5 раза и сокращению времени экспериментальной отладки технологических процессов на этапе его проектирования в лаборатории на 20%.

Литература

1. Нанотехнологии в электронике / Под ред. Ю.А. Чаплыгина. – М.: Техносфера, 2005. – 448 с.
2. Тодуа П.А., Быков В.А., Волк Ч.П. Метрологическое обеспечение измерений длины в микрометровом и нанометровом диапазонах и их внедрение в микроэлектронику и нанотехнологии // Микросистемная техника. – 2004. – Ч. 1. – №1. – С. 38–46; Ч. 2. – № 2. – С. 24–39.
3. Виноградова Г.Н., Вознесенский Н.Б. Дифракционные методы контроля геометрических параметров // Оптический журнал. – 2002. – Т. 69. – № 2. – С. 76–81.
4. Волков В.В., Герасимов Л.Л., Капаев В.В., Ларионов Ю.В. Оптические методы измерения размеров БИС и СБИС // Микроэлектроника. – 1980. – Т. 9. – Вып. 6. – С. 554–563.

Поступило 7 октября 2008 г.

Беневоленский Сергей Борисович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроники и информатики «МАТИ» – Российского государственного технологического университета им К.Э. Циолковского. *Область научных интересов:* микро- и нанoeлектроника, математическое моделирование, разработка прикладного программного обеспечения.

Истомина Наталья Леонидовна – доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры электроники и информатики «МАТИ» – Российского государственного технологического университета им К.Э. Циолковского. *Область научных интересов:* микро- и нанoeлектроника, математическое моделирование, разработка прикладного программного обеспечения.

Смирнова Анна Андреевна – инженер кафедры электроники и информатики «МАТИ» – Российского государственного технологического университета им К.Э. Циолковского. *Область научных интересов:* микро- и нанoeлектроника, математическое моделирование, разработка прикладного программного обеспечения.

Спыну Марина Валерьевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники и информатики «МАТИ» – Российского государственного технологического университета им К.Э. Циолковского. *Область научных интересов:* микро- и нанoeлектроника, математическое моделирование, разработка прикладного программного обеспечения.

Емкостная методика сканирующей зондовой микроскопии в атмосфере воздуха

И.И.Бобринецкий, В.В.Лосев

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

В основе бесконтактного емкостного метода лежит действие электродинамических сил между кантилевером и образцом. Если кантилевер и образец изготовлены из проводящего электричество материала (поверхностная проводимость не требуется), то их можно замкнуть в электрическую цепь и, прикладывая постоянное U_0 и переменное $U_1 \sin \omega t$ напряжение к кантилеверу, можно инициировать электростатическое притяжение между образцом и зондом. Схема системы кантилевер–образец представлена на рис.1.

Сила, с которой кантилевер притягивается к поверхности, равна: $F = -\frac{\partial E}{\partial Z} = -\frac{1}{2}U^2 \frac{\partial C}{\partial Z}$, где Z – расстояние от иглы кантилевера до поверхности образца. Эта сила вызывает изменение амплитуды колебаний кантилевера, которые и регистрируются в бесконтактном режиме работы СЗМ [1]. Полное напряжение между образцом и кантилевером равно $U = (U_0 - \varphi(x, y)) + U_1 \cdot \sin(\omega t)$, где $\varphi(x, y)$ – поверхностный потенциал в точке измерения. Тогда сила, действующая между образцом и кантилевером, будет равна:

$$F_z = -\left[\frac{1}{2} \left((U_0 - \varphi(x, y))^2 + \frac{1}{2} U_1^2 \right) + (U_0 - \varphi(x, y)) U_1 \cdot \sin(\omega t) - \frac{1}{4} U_1^2 \cdot \cos(2\omega t) \right] \frac{\partial C}{\partial Z}.$$

Изменение составляющей силы

$$F_{z1} = -\left[\frac{1}{2} (U_0 - \varphi(x, y) + U_1^2)^2 \right] \frac{\partial C}{\partial Z}$$

обусловлено как изменением емкости, так и изменением поверхностного потенциала. Это затрудняет интерпретацию результатов измерений.

Вторая составляющая силы равна:

$$F_{z2} = -[(U_0 - \varphi(x, y)) U_1 \sin(\omega t)] \frac{\partial C}{\partial Z}.$$

Составляющая силы F_{z3} на второй гармонике

$$F_{z3} = \left[\frac{1}{4} U_1^2 \cos(2\omega t) \right] \frac{\partial C}{\partial Z}$$

зависит только от производной емкости системы от координаты между электродами и используется для измерений в емкостной методике. Электрическая емкость системы кантилевер – образец складывается из двух емкостей, включенных последовательно: емкости зазора C_z , зависящей от расстояния кантилевер – образец, и поверхностной емкости $C_{x,y}$. Емкостная методика особенно эффективна при исследовании наноразмерных проводящих

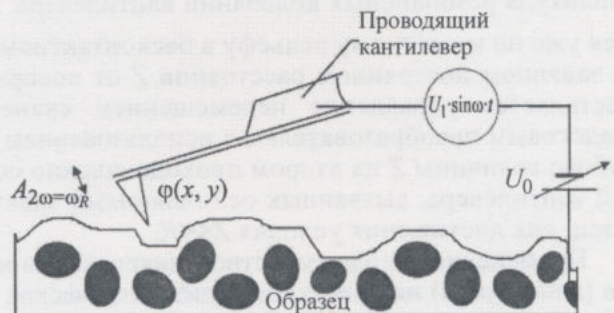


Рис.1. Схема измерения бесконтактным емкостным методом образца, содержащего различные объемные фазы

включений в диэлектрической пленке, расположенной на электроде. Емкость системы определяется выражением

$$C = \frac{C_z C_{x,y}}{C_z + C_{x,y}}.$$

Ранее была развита методика для чистых поверхностей, не покрытых адсорбатом, т.е. для поверхностей, находящихся в глубоком вакууме [1]. Для ее строгой реализации требуется условие $Z \gg R$, где R – радиус острия кантилевера. Иначе говоря, емкость межэлектродного зазора должна быть постоянной. Однако такое условие существенно понижает латеральное разрешение метода, которое в этом случае по каждой координате пропорционально Z . Наличие адсорбата воздуха на электродах, толщина которого составляет несколько нанометров [2] и который состоит в основном из воды с диэлектрической проницаемостью больше единицы, существенно меняет диэлектрическую проницаемость межэлектродного зазора. При $Z \ll R$, когда латеральное разрешение определяется радиусом кантилевера и является наивысшим, межэлектродная емкость определяется как

$$C(Z) = \frac{\epsilon S}{4\pi[\epsilon Z - d(\epsilon - 1)]},$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость адсорбата; d – его совокупная толщина между электродами ($Z > d$); S – эффективная площадь поверхности кантилевера.

В этом случае амплитуда резонансных колебаний кантилевера, инициированная переменным электрическим полем с частотой, равной половине резонансной, будет равна:

$$A_{\omega_R} \sim \frac{U_1^2}{4} \frac{\partial C}{\partial Z} \approx \frac{U_1^2}{(Z - d)^2} \frac{C_{x,y}^2}{(C_z + C_{x,y})^2}.$$

Здесь учтено, что диэлектрическая проницаемость адсорбата $\epsilon \ll 1$ и амплитуда колебаний зависит только от совокупной толщины адсорбата. Величина d остается постоянной при неизменных внешних условиях (относительной влажности и атмосферном давлении). Из формулы можно видеть, что чувствительность емкостной методики тем выше, чем меньше межэлектродный зазор. Очевидно, что амплитуда колебаний кантилевера не должна превышать межэлектродный зазор: $A_{\omega_R} < Z$.

Отметим, что емкостная методика позволяет изучать изменение величины d между проводящими электродами в зависимости от внешних условий, что следует из соотношения:

$$A_{\omega_R} \sim \frac{U_1^2}{(Z - d)^2}.$$

Лучшим аппаратным средством для реализации данной модели в СЗМ является двухпроходной метод. В двухпроходном методе каждая строка сканируется дважды: во время первого прохода строки измеряется рельеф в обычном полуконтактном режиме, а при повторном – амплитуда резонансных колебаний кантилевера A_{ω_R} . При этом второй проход осуществляется уже по известному рельефу в бесконтактном режиме, когда игла кантилевера проходит на заданном постоянном расстоянии Z от поверхности. Синхронно со сканированием осуществляется управление перемещением сканера по нормали к поверхности цифро-аналоговым преобразователем с использованием данных из памяти компьютера. Решение о выборе величины Z на втором проходе должно основываться, исходя из амплитуды колебаний кантилевера, вызванных осцилляциями электрического поля в зазоре кантилевер – образец, для достижения условия $Z \ll R$.

Применение метода емкостной микроскопии на примере обнаружения проводящих объектов (нанотрубок) на поверхности диэлектрических подложек было описано в [3]. В настоящей работе показано, что методика емкостной микроскопии может быть использована при исследовании объектов, содержащих в объеме фазы с различными электрическими свойствами. На рис.2 показано АСМ-изображение поверхности полимерной пленки, содержащей проводящую фазу наночастиц шунгита. Можно видеть, что в емкостном режиме обнаруживаются

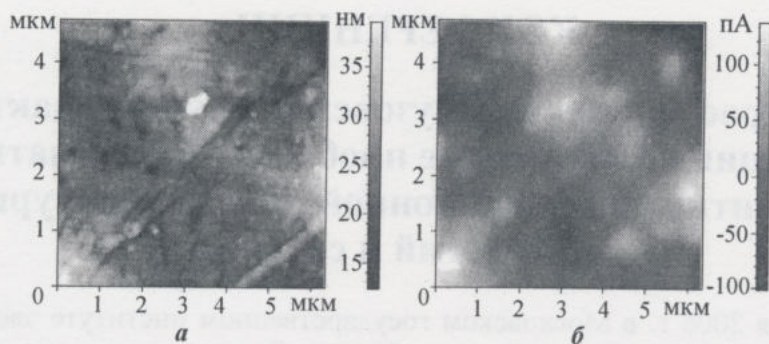


Рис.2. АСМ-изображение поверхности полимера с распределенной в объеме фазой шунгита: а – топография, б – изменение амплитуды колебаний кантилевера в емкостном режиме

фрагменты более электрически активных нанобразований шунгита, распределенных в приповерхностной контактной области полимерной пленки.

Литература

1. Быков В.А., Лосев В.В., Саунин С.А. Емкостная методика сканирующей силовой микроскопии в исследовании распределения легирующей примеси в кремнии // Материалы Всероссийского совещания «Зондовая микроскопия – 1999» (Нижний Новгород, 10–13 марта 1999 г.). – ИФН РАН. – 1999. – С. 134–140.
2. Булатов А.Н., Хартов С.В. Исследование адсорбата воздуха на твердотельных подложках методами атомно-силовой микроскопии // Изв. вузов. Электроника. – 2004. – № 4. – С. 9–17.
3. Бобринецкий И.И., Неволин В.К., Строганов А.А. «Засвечивание» углеродных нанотрубок в атомно-силовом микроскопе // Изв. вузов. Электроника. – 2004. – № 3. – С. 83–85.

Поступило 28 февраля 2008 г.

Бобринецкий Иван Иванович – кандидат технических наук, докторант Учебно-научного центра «Зондовая микроскопия и нанотехнология» МИЭТ. Область научных интересов: зондовая микроскопия, нанотехнология и нанoeлектроника.

Лосев Виктор Васильевич – кандидат физико-математических наук, профессор кафедры общей физики МИЭТ. Область научных интересов: зондовая микроскопия, оптика.

СЕМИНАРЫ

11 ноября 2008 г. Московский государственный институт электронной техники (технический университет) и компания Cadence провели семинар **«Разработка цифро-аналоговых СБИС»**. Семинар, адресованный разработчикам аналоговых и цифровых схем, топологам, инженерам по верификации, а также студентам и аспирантам соответствующих специальностей, проходил в Клубе университета под руководством технических специалистов и представителей компании Cadence.

В семинаре приняли участие 83 представителя крупнейших фирм, университетов и организаций, среди которых Freescale Semiconductor, «Микрон», «Ангстрем», Unique IC's, «Пульсар», МИФИ, МИРЭА и многие другие.

КОНФЕРЕНЦИИ

Вторая Всероссийская межвузовская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы информатизации. Развитие информационной инфраструктуры, технологий и систем»

30-31 октября 2008 г. в Московском государственном институте электронной техники (техническом университете) прошла *Вторая Всероссийская межвузовская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы информатизации. Развитие информационной инфраструктуры, технологий и систем»*. Конференция проводилась по инициативе кафедры информатики и программного обеспечения вычислительных систем (ИПОВС) МИЭТ. Цель конференции – привлечение специалистов, ученых, аспирантов и студентов к реализации научной политики по информатизации общества, обмену научно-техническими достижениями и подготовке специалистов в области информационных технологий и систем. Было подано 162 доклада.

На пленарном заседании, посвященном глобальным проблемам образования в информационном обществе, выступили заведующая кафедрой ИПОВС д-р техн. наук, проф. Гагарина Л.Г., д-р пед. наук, проф. МПГУ Овакимян Ю.О., д-р пед. наук, проф. Пустовойтов В.В., канд. пед. наук, проф. МПСИ Лейбовский М.А., канд. воен. наук доц. МИУ Ольховиков Л.А., канд. соц. наук проф. ИГУПИТ Ширяев В.П., канд. пед. наук, доц. МИБД Москаленко Н.И., канд. пед. наук, доц. МПГУ Саукова Н.М., канд. пед. наук, доц. МИЭТ Федотова Е.Л.

В ходе оживленной дискуссии выступили канд. техн. наук, проф. МИЭТ Кичкин Ю.Н., д-р техн. наук, проф. МИЭТ Лисов О.И., д-р техн. наук, проф. МИЭТ Портнов Е.М. и другие ведущие специалисты.

По вопросам эффективности применения информационных технологий с докладами выступили декан факультета прикладных информационных технологий (ПриТ) МИЭТ канд. техн. наук, доц. Балабанов А.А., канд. техн. наук, доц. ГУУ Черников Б.В., канд. физ.-мат. наук, доц. МИЭТ Ефимов Д.Е., канд. техн. наук, проф. МИЭТ Трояновский В.М..

Работа проходила по секциям «Автоматизированные информационные системы и современные информационные технологии» и «Проблемы подготовки и переподготовки специалистов в области информатики, информационных технологий и систем». В первой секции выступили 78 человек, во второй – 26.

Лучшие доклады были отмечены грамотами.



CONTENTS

Electronic engineering materials

<i>I.Kh.Khabibullin, E.V.Smidt, V.L.Matukhin</i> Study on Electronic and Magnetic Properties of Semiconductor CuFeS ₂ in 77–300 K Temperature Range.....	3
<i>A.I.Pogalov, A.M.Grushevsky, Y.G.Dolgovykh, Y.V.Surin, T.V.Vigovskaya, V.S.Bychkova</i> Study on Mode of Ultra-High Metal-Insulator-Semiconductor Diode Stressed-Deformation Materials Hermetic Assembly Design.....	8
<i>A.V.Rudnev, A.V.Khlynov</i> Use of Scanning Probe Microscopy in Study of Electrodeposition On Platinum in Presence of Organic Additive	15

Microelectronics technology

<i>V.A.Bespalov, V.A.Ovchinnikov, D.V.Bazanov, S.M.Avakov</i> Methods of Repairing Original Integrated Circuit Layout Defects on Photomasks.....	20
<i>S.V.Gavrilov, O.N.Gudkova, E.R.Kagramanyan</i> Reliability Analysis of Digital CMOS Circuits Taking into Account Degradation Effects of Transistors.....	30

Information technologies

<i>V.D.Koldaev</i> Heuristic and Quasi-Topological Algorithms of Image Contour Segmentation.....	41
<i>A.S.Parfenenko, A.V.Rybachek, E.S.Rybalko</i> Peculiarities of Associative Memory Functioning and Applications.....	46

Integrated radioelectronic devices

<i>J.V.Chirkounova, K.S.Lyalin, V.I.Oreshkin</i> Study on Algorithm of Multiple Access with Space Division of Channels in System with Smart Antenna Array.....	52
<i>V.E.Alekseev, Yu.V.Savchenko, A.N.Solovyev</i> Problems of Composing Kalman Filter in Multi-Antenna GPS/GLONASS System	58

Measurement methods and technology

<i>A.L.Filatov, A.V.Gerus, E.M.Korablev, A.V.Lugovskoi</i> Local Measurement of Electric-Optical Parameters of Silicon Structures Based on Photorefractive Effect.....	66
--	----

University education problems

<i>V.K.Grigoriev, A.V.Grushin</i> Automated Examination-Bulletins Processing Method of Full-Function Information-Operation System «Dean's Office».....	71
--	----

Brief reports

<i>A.G.Efimov, V.F.Panin</i> Bandpass Filters on Dielectric Resonators with High Permittivity.....	79
<i>V.P.Betz, A.V.Kovtonjuk, A.V.Kantor, A.V.Nevzorov, A.E.Shirshakov</i> Telemetric System for Data Collection and Registration of «Phoebes-Ground» Spacecraft Descending Apparatus (lander) Model for Experimental Range Tests.....	81
<i>S.B.Benevolenskiy, N.L.Istomina, A.A.Smirnova, M.V.Spynu</i> Program Complex for Systems of Diffractometrical Control and Measurement of Geometrical Parameters of IC's Units Topology.....	83
<i>I.I.Bobrinetskii, V.V.Losev</i> Scanning Probe Microscopy Capacitance Technique in Air.....	85

ABSTRACTS

ELECTRONIC ENGINEERING MATERIALS

Study on Electronic and Magnetic Properties of Semiconductor CuFeS_2 in 77–300 K Temperature Range

I.Kh.Khabibullin, E.V.Smidt, V.L.Matukhin

The specific conductivity of photocrystalline samples of chalcopyrite CuFeS_2 in the 77–300 K temperature range has been investigated. The distinction in behavior of electric conductivity in the low temperature areas of the investigated samples has been revealed. The detailed study on the spectrum of the Cu nuclear magnetic resonance in the CuFeS_2 local field has been performed.

Study on Mode of Ultra-High Metal-Insulator-Semiconductor Diode Stressed-Deformation Materials Hermetic Assembly Design

A.I.Pogalov, A.M.Grushevsky, Y.G.Dolgovykh, Y.V.Surin, T.V.Vigovskaya, V.S.Bychkova

The mode of ultra-high metal-insulator-semiconductor diode stressed-deformation materials hermetic assembly design, implemented based on the bond silicon membrane with two gold beam-leads under the effect of temperature and an increased atmospheric pressure, has been investigated. The construction is protected by various sealing materials based on lacquers, enamels and compounds. The recommendations on minimization of the stressed-deformation mode of connection of various materials by optimization of the design and technology of the diode have been developed.

Use of Scanning Probe Microscopy in Study of Electrodeposition On Platinum in Presence of Organic Additive

A.V.Rudnev, A.V.Khlynov

The influence of acetic-nitrile adsorption on kinetics and the copper electric crystallization mechanism on high quality Pt(111) monocrystals in the sulfate aqueous solution has been investigated. The investigations have been performed using the electro-chemical scanning probe microscope.

MICROELECTRONICS TECHNOLOGY

Methods of Repairing Original Integrated Circuit Layout Defects on Photomasks

V.A.Bespalov, V.A.Ovchinnikov, D.V.Bazanov, S.M.Avakov

The methods of repairing the integrated circuit layout defects on photomasks have been analyzed. The most effective methods for removal of the clear and opaque defects in manufacture of the photomasks for ICs with the standards of up to 90 nm modes have been revealed.

Reliability Analysis of Digital CMOS Circuits Taking into Account Degradation Effects of Transistors

S.V.Gavrilov, O.N.Gudkova, E.R.Kagramanyan

The problems of the reliability analysis of the digital CMOS VLSI circuits have been considered, which arise when the scaling brings the transistor sizes down to the nanometer region. The modeling approaches of one of the major IC factors, namely the negative-bias temperature instability (MBTI), have been analyzed. The model of the PMOSFET threshold voltage degradation has been proposed taking into account the NBTI effect. The signal probability propagation algorithm has been proposed and developed in order to improve the degradation estimation accuracy. The estimation of the timing parameter variations of the digital standard cells has been performed on the basis of the proposed model. The static timing analysis flow has been developed taking into account the sensitivities of the timing parameters to the mentioned variations of the transistors threshold voltages.

INFORMATION TECHNOLOGIES

Heuristic and Quasi-Topological Algorithms of Image Contour Segmentation

V.D.Koldaev

The empiric algorithm of the segmentation task solution in the tech vision systems has been considered. The analysis of the heuristic and quasi-topological contour segmentation algorithms has been carried out and the preferable fields of their use have been shown. The hierarchical data organization for the image analysis and processing has been offered.

Peculiarities of Associative Memory Functioning and Applications

A.S.Parfenenko, A.V.Rybachek, E.S.Rybalko

The algorithm of search with the associative memory application has been presented. The application features of the associative memory in computer networks and the implementation features of the associative memory blocks have been considered.

INTEGRATED RADIOELECTRONIC DEVICES

Study on Algorithm of Multiple Access with Space Division of Channels in System with Smart Antenna Array

J.V.Chirkounova, K.S.Lyalin, V.I.Oreshkin

The issues of applying the multipath smart antenna array for creation the systems of multiple access with space division of channels have been considered. The classification of the basic algorithms of signal space processing has been presented. The method of constructing the assigned form antenna pattern has been described. The results of the study on the algorithm of the multipath antenna pattern formation for the multiple access realization have been given.

Problems of Composing Kalman Filter in Multi-Antenna GPS/GLONASS System

V.E.Alekseev, Yu.V.Savchenko, A.N.Solovyev

The most effective algorithm of the float solution determination using the Kalman filter in GPS/GLONASS systems has been considered. Special attention has been given to the problems of this algorithm implementation connected with the change of the visible satellite group. The methods of solving these problems have been offered, and the experimental estimation has been presented.

MEASUREMENT METHODS AND TECHNOLOGY

Local Measurement of Electric-Optical Parameters of Silicon Structures Based on Photorefractive Effect

A.L.Filatov, A.V.Gerus, E.M.Korablev, A.V.Lugovskoi

Based on the analysis of the photorefractive effect studies the new techniques of the pump light absorption coefficient and of the probe light refractive index dependence on the non-equilibrium carrier density have been proposed. The peculiarities of applying the proposed techniques have been theoretically and experimentally investigated.

UNIVERSITY EDUCATION PROBLEMS

Automated Examination-Bulletins Processing Method of Full-Function Information-Operation System «Dean's Office»

V.K.Grigoriev, A.V.Grushin

The problems of computer support in the educational process control have been considered on an example of the author's full-function information-control system «Dean's office MIREA». The process of output and input of the students' test-examination records has been distinguished. The model of the record structure has been proposed, and the mark recognition methods based on the bar-code identification has been considered. The results of the study on the recognition methods have been presented.

BRIEF REPORTS

Bandpass Filters on Dielectric Resonators with High Permittivity

A.G.Efimov, V.F.Panin

The issues of application of dielectric resonators in the reception modules for work in the complicated electromagnetic conditions have been considered. The design of the bandpass filters based on the dielectric resonators has been described. The results of the experimental studies have been presented.

Telemetric System for Data Collection and Registration of «Phoebes-Ground» Spacecraft Descending Apparatus (lander) Model for Experimental Range Tests

V.P.Betz, A.V.Kovtonjuk, A.V.Kantor, A.V.Nevzorov, A.E.Shirshakov

The purpose, the structure principles and the basic peculiarities of implementing the telemetric system (TMS) of the data collection and registration of the spacecraft «Phoebes-Ground» descending apparatus (DA) model have been described. TMS consists of different purpose sensors (overload, angular speed, temperature and pressure), GPS – receiver for coordinates determination and the memory device. During the tests the descending apparatus model telemetric system (in the process of descending and impact with the ground surface) writes and saves the measurement values in the memory device.

Program Complex for Systems of Diffractometrical Control and Measurement of Geometrical Parameters of IC's Units Topology

S.B.Benevolenskiy, N.L.Istomina, A.A.Smirnova, M.V.Spynu

The program complex, which permits to decrease a methodical error of the diffractometrical method of measuring geometrical sizes of the topology units, introduced at the modeling analysis stage, has been described. The program complex includes the settlement module, the databank of parameters of virtual test structures, the auxiliary search system and the complex of procedures for visualization of the obtained results.

Scanning Probe Microscopy Capacitance Technique in Air

I.I.Bobrinetskii, V.V.Losev

It has been shown that the presence of adsorbate on the measured surfaces in air changes the conditions of the capacitance technique applicability in the scanning probe microscopy and increases its resolution. The technique realization examples have been presented.

Тематический указатель статей, опубликованных в 2008 году

Фундаментальные исследования

- Горбачев А.А., Журавлев М.В., Капаев В.В.* Квазибезотражательные потенциалы в полупроводниковых наногетероструктурах. № 2, с. 3.
- Коноплев Б.Г., Рындин Е.А.* Исследование транспорта носителей заряда в связанных квантовых областях. № 2, с. 14.
- Лавров И.В.* Теория электропроводности неоднородных материалов с текстурой. № 1, с. 3.
- Морозова Н.К., Мидерос Д.А.* Связанный экситон на SA и SAL центрах ZnS(O) и ZnSe(O). № 3, с. 3.

Материалы электронной техники

- Авров Д.Д., Дорожкин С.И., Таиров Ю.М., Фадеев А.Ю., Лебедев А.О.* О включениях углерода при выращивании слитков карбида кремния модифицированным методом Лэли. № 2, с. 23.
- Аль-Хадрами И.С., Королев А.Н., Семенистая Т.В., Назарова Т.Н., Петров В.В.* Исследование газочувствительных свойств медьсодержащего полиакрилонитрила. № 1, с. 20.
- Варавин В.С., Сидоров Г.Ю.* Образование акцепторных центров при воздействии окислительно-восстановительных сред на поверхность пленок $Cd_xHg_{1-x}Te$. № 5, с. 3.
- Вигдорович Е.Н.* Термодинамические аспекты формирования квантоворазмерных гетероструктур на основе GaN. № 3, с. 18.
- Вигдорович Е.Н., Свешников Ю.Н.* Получение квантово-размерных гетероструктур на основе GaN. № 4, с. 3.
- Грибов Б.Г., Зиновьев К.В.* Новые технологии получения поликристаллического кремния для солнечной энергетики. № 3, с. 10.
- Димитрюк А.А., Одуев В.В.* Комплексная магнитная проницаемость ферритовых материалов СВЧ-диапазона. № 2, с. 32.
- Ермошин И.Г., Цыпленков И.Н., Свешников Ю.Н.* Оптимизация технологии получения гетероструктур GaN с использованием данных дифрактометрического анализа. № 2, с. 49.
- Неустроев С.А.* Модель структуры вюрцитных и кубических нитридов металлов IIIa группы. № 3, с. 26.
- Осипенкова Н.Г., ШUTOVA P.Ф., Козлова Е.Е.* Исследование состава материалов на основе функциональных стекол для изготовления толстопленочных терморезистивных датчиков. № 2, с. 43.
- Поголов А.И., Грушевский А.М., Долговых Ю.Г., Сурин Ю.В., Виговская Т.В., Бычкова В.С.* Исследование напряженно-деформированного состояния материалов герметизированной сборочной конструкции СВЧ МДП-диодов. № 6, с. 8.
- Руднев А.В., Хлынов А.В.* Использование сканирующей зондовой микроскопии в исследованиях электроосаждения меди на платине в присутствии органической добавки. № 6, с. 15.
- Светличная Л.А., Милешко Л.П., Королев А.Н.* Электрофизические свойства анодных пленок хлорсодержащего Cu_2O на стеклотекстолите. № 2, с. 39.
- Хабибуллин И.Х., Шмидт Е.В., Матухин В.Л.* Исследование электронных и магнитных свойств полупроводникового соединения $CuFeS_2$ в диапазоне температур 77-300 К. № 6, с. 3.
- Яременко Н.Г., Карачевцева М.В., Страхов В.А., Галиев Г.Б., Мокеров В.Г.* Фотолюминесценция эпитаксиальных слоев GaAs, легированных кремнием. № 1, с. 10.

Технология микроэлектроники

Беспалов В.А., Овчинников В.А., Базанов Д.В., Аваков С.М. Методы устранения дефектов топологии интегральных микросхем на фотошаблонах. № 6, с. 20.

Вишиницкий А.Ф., Грушевский А.М., Ларионов Н.М., Погалов А.И., Резник А.Ю. Исследование и моделирование термостойкости пластиковых бесконтактных идентификационных карт. № 5, с. 18.

Гаврилов С.В., Гудкова О.Н., Каграманян Э.Р. Анализ надежности функционирования цифровых КМОП СБИС с учетом эффектов деградации транзисторов. № 6, с. 30.

Овчинников В.А. Исследование технологического процесса устранения прозрачных дефектов маскирующего покрытия фотошаблонов. № 5, с. 11.

Микроэлектронные приборы и системы

Алексеев Ю.И., Демьяненко А.В. Определение влияния оптического сигнала на импедансные свойства лавинно-пролетного диода. № 3, с. 58.

Бобрешов А.М., Хребтов И.В., Ряполов М.П. Влияние конструктивных параметров субмикронных НЕМТ-транзисторов на верхнюю границу динамического диапазона линейности усилителей. № 3, с. 32.

Гуминов Н.В., Старосельский В.И. Прецизионный истоковый повторитель с малым входным током на полевых транзисторах с управляющим барьерным контактом. № 1, с. 43.

Игнатьева Е.А., Уздовский В.В., Хайновский В.И. Расчет конструктивных параметров и электрического потенциала трехдиодной вертикально интегрированной спектрально-селективной фотоячейки. № 1, с. 35.

Кацоев Л.В., Кацоев В.В., Ильичев Э.А. Оптимизация структуры детекторов на основе арсенида галлия с учетом рекомбинационных потерь. № 3, с. 52.

Лосев В.В. Инжекционные фотодиоды на основе низкоомных монокристаллов ZnS. № 4, с. 17.

Мальцев А.В. Особенности движения заряженных частиц в ВЧ-поле при амплитудной модуляции питающего напряжения квадрупольного фильтра масс. № 4, с. 22.

Нисков В.Я., Золотарев С.Н., Гашиков А.Н. Исследование влияния конструктивно-технологических факторов на проводимость и пробивное напряжение латеральных ДМОП-транзисторов средствами численного моделирования. № 3, с. 45.

Тимошенков В.П., Братов В.А. Преобразователь кодов NRZ в NRZM на арсенидгаллиевых гетеропереходных биполярных транзисторах. № 1, с. 26.

Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Куликов М.Ю. Фотонные структуры и их использование для измерения параметров материалов. № 5, с. 25.

Хайновский В.И., Игнатьева Е.А., Уздовский В.В. Анализ процессов фоторелаксации и фотоэлектрических характеристик трехдиодной вертикально интегрированной спектрально-селективной фотоячейки. № 3, с. 38.

Хайновский В.И., Игнатьева Е.А., Уздовский В.В. Фотоэлектрические процессы в пятидиодной вертикально интегрированной спектрально-селективной фотоячейке. № 4, с. 10.

Чаплыгин Ю.А., Артамонова Е.А., Красюков А.Ю., Крупкина Т.Ю. Исследование тепловых эффектов и явлений саморазогрева в планарных силовых МОП-транзисторах КНИ-типа. № 2, с. 52.

Нанотехнология

Агеева С.А., Бобринецкий И.И., Неволин В.К., Подгаецкий В.М., Селищев С.В., Симунин М.М., Конов В.И., Савранский В.В. Объемный альбуминовый композит на основе нанотрубок, получаемый действием непрерывного лазерного излучения. № 5, с. 33.

Максимов С.К., Максимов К.С. Проблемы текстурированности в нанотехнологии. Контроль текстур. № 1, с. 49.

Царик К.А., Лосев В.В., Бараиш С.В. Формирование нанометровых слоев фокусированным ионным пучком. № 3, с. 63.

Схемотехника и проектирование

Булах Д.А. Применение компиляционного подхода к моделированию аналоговых схем. № 4, с. 26.

Кремлев В.Я., Крупкина Т.Ю., Николаев А.В. Построение цифровых схем на основе элементов конденсаторно-транзисторного типа. № 1, с. 56.

Крупкина Т.Ю., Лосев В.В., Муханюк Н.Н., Путря М.Г. Автоматизация проектирования библиотек стандартных элементов на основе параметризованных ячеек в САПР Cadence. № 4, с. 31.

Латников Д.С., Миропольский М.С. Аналоговая ячейка коммутации к тестовой шине для измерения внутренних сигналов интегральных микросхем. № 5, с. 51.

Стемпковский А.Л., Гаврилов С.В., Казрамян Э.Р. Методы логико-временного анализа заказных блоков СБИС. № 5, с. 41.

Микросистемы

Борисов А.Г., Маханько Е.С., Чиликина Т.Д., Иванова О.М., Крутоверцев С.А. Газовый оптический сенсор на основе планарного многомодового волновода. № 2, с. 61.

Бритов А.Д., Белоконев В.М., Надеждинский А.И., Наместников Д.Ю., Понуровский Я.Я. Лазерный детектор дистанционного обнаружения газов CO_2 , CH_4 и NH_3 . № 2, с. 65.

Тимошенко С.П., Шилов В.Ф., Бойко А.Н., Симонов Б.М. Исследование влияния газового демпфирования на параметры микроакселерометров. № 2, с. 58.

Информационные технологии

Автушенко К.И. Алгоритм обнаружения сердечного ритма плода в доплеровском сигнале. № 3, с. 77.

Александров А.А., Коплович Е.А., Умняшкин С.В. Алгоритм видеокompрессии на основе дискретного вейвлет-преобразования с трехслойной схемой кодирования векторов движения. № 5, с. 69.

Земсков В.Н., Бегишев С.В. Кодирование с предсказанием в модифицированной системе сжатия методом ДИКМ. № 2, с. 78.

Колдаев В.Д. Эвристические и квазитопологические алгоритмы контурной сегментации изображений. № 6, с. 41.

Кучинский А.С., Путря Ф.М. Симулятор многоядерной вычислительной системы и примеры его применения. № 2, с. 72.

- Лупин С.А., Шерина Е.В., Пономарева Н.Ю.** Формализация процессов интеграции информационных систем на основе теории множеств. № 3, с. 68.
- Назаров Л.Е., Головкин И.В.** Оценки вероятностей ошибки при посимвольном приеме ансамблей ортогональных и симплексных сигналов. № 5, с. 63.
- Парфененко А.С., Рыбачек А.В., Рыбалко Е.С.** Особенности функционирования и применений ассоциативной памяти. № 6, с. 46.
- Переверзев А.Л.** Аппаратная реализация одномерного медианного фильтра с модульной архитектурой. № 1, с. 68.
- Слюсарь В.В., Баин А.М., Со Тант** Методика автоматизированного анализа документированной информации в системах поддержки принятия решений. № 3, с. 81.
- Терентьев А.И.** Идентификация параметров функционирования сложных технических систем на основе априорной информации и результатов испытаний. № 5, с. 56.
- Четверик В.Н.** Дифференциальный радиоконтраст в задачах оценки качества радиолокационных изображений. № 1, с. 62.

Интегральные радиоэлектронные устройства

- Алексеев В.Е., Савченко Ю.В., Соловьев А.Н.** Проблемы построения фильтра Калмана в многоантенной системе на основе спутниковых сигналов GPS/GLONASS. № 6, с. 58.
- Орешкин В.И., Лялин К.С., Чиркунова Ж.В.** Особенности проектирования цифровых антенных решеток. № 4, с. 36.
- Садков В.Д., Уткин В.Н.** Разработка чип-аттенюатора для поверхностного монтажа на основе распределенных резистивных структур. № 4, с. 42.
- Чиркунова Ж.В., Лялин К.С., Орешкин В.И.** Исследование алгоритма множественного доступа с пространственным разделением каналов в системе с цифровой антенной решеткой. № 6, с. 52.

Методы и техника измерений

- Бурдинский И.Н.** Применение программируемой матричной логики для корреляционной обработки шумоподобных гидроакустических сигналов. № 4, с. 62.
- Вернер В.Д., Гайдуков Г.Н., Пагин П.С.** Исследование влияния модификации поверхности микрорезонаторов на их частотные свойства. № 4, с. 55.
- Кострицкий С.М., Дикевич А.А., Коркишко Ю.Н., Фёдоров В.А.** Метод измерения точки росы, основанный на эффекте изменения коэффициента отражения от скола волокна. № 5, с. 74.
- Максимов С.К.** Особенности, методика и преимущества интегрального метода исследования текстур наноразмерных кристаллитов в электронной микроскопии. I. Физические основы метода. № 3, с. 85.
- Максимов С.К.** Особенности, методика и преимущества интегрального метода исследования текстур наноразмерных кристаллитов в электронной микроскопии. II. Практическая реализация метода. № 4, с. 47.
- Терещенко С.А., Потапов Д.А., Скоринкин И.С.** Исследование прохождения оптического излучения через многослойные рассеивающие среды в приближении «рассеяние прямо назад». № 5, с. 79.
- Филатов А.Л., Луговской А.В.** Использование фоторефрактивного эффекта для комплексного трехмерного локального измерения электрофизических и термических параметров кремниевых структур. № 1, с. 74.
- Филатов А.Л., Герус А.В., Кораблев Е.М., Луговской А.В.** Локальное измерение электрооптических параметров кремниевых структур на основе фоторефрактивного эффекта. № 6, с. 66.
- Хаханина Т.И., Гурская А.А.** Применение инверсионной вольтамперометрии для контроля содержания микропримесей в синтетическом сапфире. № 1, с. 79.

Проблемы высшего образования

- Акуленок М.В., Коринтели Н.З., Сиврюкова Ю.Ю.* О роли компетентностного подхода в обеспечении качества профессионального образования. № 2, с. 85.
- Григорьев В.К., Грушин А.В.* Методика автоматизированной обработки зачетно-экзаменационных ведомостей в полнофункциональной ИУС «Деканат». № 6, с. 71.
- Мязина Р.А.* Особенности формирования готовности студентов к использованию информационных компьютерных технологий в свете компетентностного подхода. № 2, с. 90.

Краткие сообщения

- Батырев Е.В., Тхейн Лин У* Лепестковый датчик угловых координат солнечной энергетической установки. № 4, с. 72.
- Беневоленский С.Б., Истомина Н.Л., Смирнова А.А., Спыну М.В.* Программный комплекс для систем дифрактометрического контроля и измерения геометрических параметров элементов топологии ИМС. № 6, с. 83.
- Бец В.П., Ковтонюк А.В., Кантор А.В., Невзоров А.В., Ширшаков А.Е.* Телеметрическая система сбора и регистрации данных макета спускаемого аппарата космического аппарата «Фобос-Грунт» для обеспечения полигонных испытаний. № 6, с. 81.
- Бирюков В.Н.* Четырехпараметрическая S_{∞} -непрерывная компактная модель полевого транзистора. № 4, с. 69.
- Бобринецкий И.И., Лосев В.В.* Емкостная методика сканирующей зондовой микроскопии в атмосфере воздуха. № 6, с. 85.
- Гулидов Д.Н., Бородин Е.В., Селезнев К.А., Ивченко В.Н.* Функционально-итерационное проектирование СМК, соответствующей ГОСТ Р ИСО 9001:2001. № 1, с. 84.
- Гуреев А.В., Воронин С.Е.* Генератор гауссовских импульсов для сверхширокополосных приемопередатчиков. № 4, с. 74.
- Ездаков А.Л.* Объектно-ориентированная диагностическая экспертная система «МАЛЭКС». № 4, с. 78.
- Ефимов А.Г., Панин В.Ф.* Полосно-пропускающие фильтры на диэлектрических резонаторах с высокой проницаемостью. № 6, с. 79.
- Милешко Л.П.* Влияние режима формирования анодных оксидных пленок кремния в гальваностатическом режиме на содержание в них фосфора. № 4, с. 68.
- Сергеев В.А., Дулов О.А., Куликов А.А.* Компьютерное моделирование неизотермического токораспределения в симметричных биполярных транзисторных структурах с дефектами. № 5, с. 86.
- Соколов Е.Б., Батюня Л.П.* Получение пленок нитрида бора методом ВЧ-магнетронного распыления. № 5, с. 84.
- Трояновский В.М.* Компьютерное моделирование процедур идентификации динамических объектов. № 4, с. 76.
- Уткин В.Н., Садков В.Д., Якимов Д.Ю.* Расчет Т-образных поглощающих элементов чип-аттенуаторов для поверхностного монтажа. № 1, с. 86.

Юбилей

- Арменскому Егению Викторовичу - 85 лет. № 5, с. 91.
- Бархоткину Вячеславу Александровичу - 70 лет. № 1, с. 91.
- К 90-летию со дня рождения Гуськова Геннадия Яковлевича. № 5, с. 92.
- Копаеву Юрию Васильевичу - 70 лет. № 1, с. 89.
- Королеву Михаилу Александровичу - 75 лет. № 2, с. 94.

95 лет со дня рождения Курбатова Леонида Николаевича. № 1, с. 93.

К 100-летию со дня рождения Лукина Федора Викторовича. № 4, с. 95.

Орликовскому Александру Александровичу - 70 лет. № 4, с. 90.

К 90-летию со дня рождения Преснухина Леонида Николаевича. № 4, с. 92.

Конференции. Семинары. Выставки

Вторая Всероссийская межвузовская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы информатизации. Развитие информационной инфраструктуры, технологий и систем». № 6, с. 88.

15-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика - 2008». № 1, 4-я стр. обложки.

II Московская межвузовская научно-практическая конференция «Студенческая наука». № 1, с. 25.

Российско-Баварская конференция по биомедицинской технике (RBC-2008). № 3, 2-я стр. обложки.

IV Международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в науке, технике и образовании». № 3, 3-я стр. обложки.

Вернер В.Д., Сауров А.Н., Резнев А.А. Выбор тактики и стратегия производства изделий электроники (выставка «Продуктроника – 2007», г. Мюнхен, Германия). № 4, с. 80.

Об итогах 15-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2008». № 4, с. 88.

Об итогах Девятой Международной конференции «Исследование и применение нанотрубок» (г. Монтпелье, Франция). № 5, с. 89.

VIII Всероссийская выставка научно-технического творчества молодежи. № 5, с. 90.

Памяти Курова Грациана Александровича. № 4, с. 98.

Памяти Мурыгина Виктора Ивановича. № 5, с. 94.