

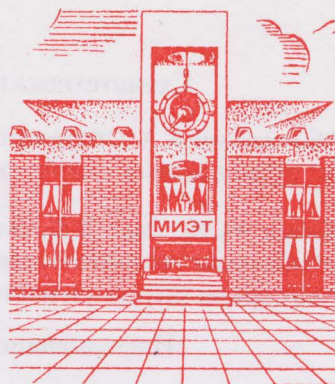
Известия высших учебных заведений

ЭЛЕКТРОНИКА 6'2006

Научно-технический журнал

Издается с 1996 г.

Выходит 6 раз в год



СОДЕРЖАНИЕ

Технология микроэлектроники

Скворцов А.М., Халецкий Р.А., Соколов В.И.
Исследование характеристик структуры Si-SiO₂ с поликремниевым затвором в зависимости от режимов термического окисления..... 3

*Тимошенков С.П., Зотов С.А., Калугин В.В.,
Воротников А.А., Рубиц В.Г., Прокопьев Е.П.* Влияние пористости поверхностных слоев на жесткость подвеса чувствительного элемента МЭМС на основе структур КНИ..... 9

Микроэлектронные приборы и системы

Гваськов А.А., Жигальский Г.П., Ситкин П.О.
Исследование 1/f-шума МДП-транзисторов с разным типом проводимости канала..... 13

*Иванова О.М., Крутоверцев С.А., Анисимов В.А.,
Борисов А.Г., Чиликина Т.Д.* Оптический сенсор для определения аммиака в воздухе..... 20

Нанотехнология

*Чаплыгин Ю.А., Усанов Д.А., Скрипаль А.В.,
Абрамов А.В., Боголюбов А.С.* Методика измерения электропроводности нанометровых металлических пленок в слоистых структурах по спектрам отражения электромагнитного излучения..... 27

Учредители:

Министерство
образования и науки
Российской Федерации

Московский
государственный институт
электронной техники
(технический университет)

Главный редактор
В.Д.Вернер

Редакционная коллегия:

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

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

Схемотехника и проектирование

Малинаускас К.К. Обзор алгоритмов поиска кратчайших путей в задачах сжатия топологии ИС 36

Кобзев Ю.М., Эннс В.В., Эннс В.И. Моделирование интегральных магниточувствительных схем на основе магниторезистивных элементов 56

Информационные технологии

Янчук Е.Е. Интегрированные устройства цифрового сопряжения мультиплексирования и каналаобразования для радиорелейных линий связи 65

Ашарина И.В. Методы информационного согласования в двухкомплексной системе 73

Проблемы высшего образования

Чаплыгин Ю.А., Поспелов А.С., Гаврилов С.А., Прокофьев А.А. Центры формирования компетенций как механизм реализации компетентностного подхода в подготовке и переподготовке инженерных кадров для инновационной экономики 79

Краткие сообщения

Умняшкин С.В., Коплович Д.М., Черкасов И.В., Александров А.А. Алгоритм сжатия изображений на основе контекстного скалярно-векторного квантования в области дискретного вейвлет-преобразования.... 86

Аникин А.В., Литвинов Ю.М. Рентгеновская диагностика структуры и глубины повреждений в механически обработанных пластинах сапфира 89

Юбилей

Таирову Юрию Михайловичу — 75 лет 91

Конференции

14-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика — 2007» 3 стр. обложки

Contents 93
Abstracts 94
Тематический указатель статей, опубликованных в 2006 году 97
К сведению авторов 103

Заведующая редакцией
С.Г.Зверева

Редактор
А.В.Тихонова

Научный редактор
С.Г.Зверева

Художественный редактор
А.В.Тихонова

Корректор
Л.Ф.Летунова

Технический редактор
Л.Г.Лосякова

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

Подписано в печать 06.12.06
Формат бумаги 60х84 1/8.
Печать офсетная
Объем 12,09 усл.печ.л.,
11,3 уч.-изд.л.
Заказ № 214.

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.

ТЕХНОЛОГИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.315.5/6; 621.382.049.77

Исследование характеристик структуры Si-SiO₂ с поликремниевым затвором в зависимости от режимов термического окисления

А.М.Скворцов, Р.А.Халецкий

Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики

В.И.Соколов

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург)

Проведено исследование влияния поликремниевого затвора на характер изменения встроенного заряда в термическом окисле в зависимости от режимов окисления кремния. Показано, что характер изменения заряда в диоксиде кремния в процессе формирования поликремниевой пленки зависит от уровня внутренних механических напряжений, которые возникают при термическом окислении.

Поликремний (Si*) является наиболее распространенным материалом затвора в КМОП интегральных схемах (ИС). Его применение по сравнению с алюминием обеспечивает увеличение быстродействия КМОП ИС, снижение порогового напряжения, а также существенное уменьшение площади МОП-транзисторов. Постоянное сокращение толщины подзатворного SiO₂ приводит к тому, что при рассмотрении электронных процессов в канале МОП-транзистора следует учитывать влияние внешней межфазной границы окисел-затвор. При изготовлении поликремниевого затвора МОП-транзистора возникают трудности, связанные с воспроизведением электрофизических свойств системы кремний-окисел-поликремний, что обусловлено влиянием как электрофизических факторов [1], так и механических напряжений в системе окисел-поликремний [2, 3]. Однако полного понимания механизмов, ответственных за изменение зарядовых характеристик окисла при использовании поликремниевого затвора, пока нет. Целью настоящей работы является исследование влияния поликремния на зарядовое состояние подзатворного окисла в зависимости от режимов термического окисления.

Эксперимент. Экспериментальные образцы представляли собой структуры Si-SiO₂ и Si-SiO₂-Si*-Al, которые были получены следующим образом. Подложкой образцов служил кремний электронного типа проводимости марки КЭФ 7,5 (100). После предварительной химической очистки пластин в смеси Каро и перекисно-аммиачном растворе производилось термическое окисление в различных режимах, представленных в табл.1.

Таблица 1

Режимы термического окисления экспериментальных структур

№ образца	Толщина окисла, нм	Продолжительность термического окисления, мин				Температура окисления, °C
		в сухом O ₂	во влажном O ₂	в сухом O ₂	суммарное время	
1	80	10	100	10	120	850
2	120	10	18	10	38	1000
3	120	90	-	-	90	1050
4	150	120	-	-	120	1050

После окисления часть образцов проходила этап формирования затвора из поликристаллического кремния. Осажденный при 640 °C из SiH₄ слой Si* (0,6 мкм) легировался фосфором методом термической диффузии в течение 1 ч при температуре 860 °C. После фотогравировки в слое Si* производился окончательный отжиг поликремния при 860 °C в течение 30 мин в среде азота. Затем термовакуумным напылением на обе стороны пластины для получения омического контакта наносился слой Al с последующими фотогравировкой в верхнем слое Al и отжигом при температуре 450 °C в течение 15 мин в среде влажного азота.

На экспериментальных структурах производились измерения высокочастотных вольт-фарадных характеристик (ВФХ). В качестве материала верхнего контакта на участках структур, свободных от слоев Si*–Al, использовался InGa.

Результаты и обсуждение. На рис.1 приведены нормированные экспериментальные ВФХ образцов с окислами одинаковой толщины (0,12 мкм), полученными по ком-

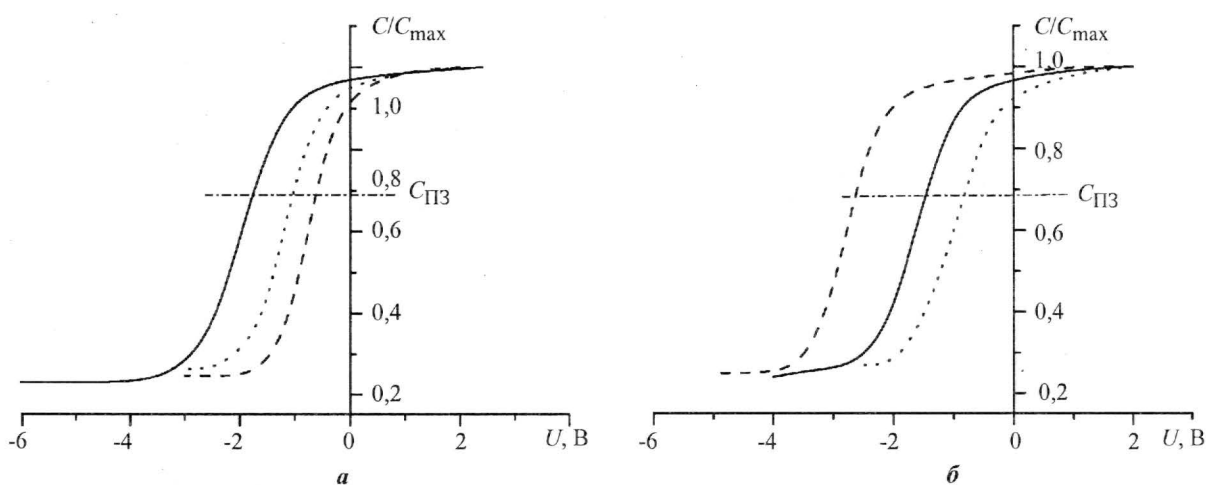


Рис.1. ВФХ образцов с окислами, полученными комбинированным (а) и сухим (б) окислением, на различных этапах формирования экспериментальных структур: — после окисления; ---- на участке с Si*; на участке без Si* после формирования затвора

бинированной схеме окисления (рис.1,а) и сухим окислением (рис.1,б). Из рис.1 видно, в процессе окисления в окислах наблюдается появление положительного встроенного заряда Q_f , о чем свидетельствует сдвиг ВФХ в сторону отрицательных значений напряжений относительно оси ординат на уровне $C_{ПЗ}$. При этом значение плотности заряда Q_f можно легко рассчитать по следующей формуле [4]:

$$Q_f = -U_{ПЗ}C_{\max},$$

где $U_{ПЗ}$ – напряжение, которое определяется на уровне емкости $C_{ПЗ}$, соответствующей режиму плоских зон (см. рис.1); C_{\max} – удельная емкость окисла. Необходимо отметить, что $U_{ПЗ}$ учитывает не только встроенный заряд в окисле, но также и заряд на поверхностных состояниях. Сумма этих зарядов называется эффективным зарядом окисла. В нашем случае дополнительные расчеты показали, что зарядом на поверхностных состояниях можно пренебречь.

После окисления проводились нанесение слоя поликремния, его легирование, гравировка и термообработка. На рис.1 показаны ВФХ, измеренные на участках структур, оказавшихся свободными от пленки поликристаллического кремния при фотолитографии. Видно, что процесс формирования поликремниевого затвора приводит к остаточному сдвигу ВФХ (кривые после удаления слоя поликремния обозначены точками) в сторону положительных напряжений относительно исходных ВФХ, что эквивалентно появлению компенсирующего отрицательного заряда. При этом для структур Si-SiO₂-Si^{*}-Al с диоксидом кремния, полученным комбинированным окислением, наблюдается незначительное дополнительное смещение ВФХ в сторону положительных напряжений. В то же время для структур Si-SiO₂-Si^{*}-Al с сухим окислом ВФХ претерпевают существенный сдвиг в сторону отрицательных напряжений.

Охарактеризовать влияние процесса формирования поликремниевого затвора на окисел можно с помощью выражения $\Delta Q_f = Q_f - Q_l$, где Q_f – заряд, образованный при термическом окислении, а Q_l – заряд, образованный при формировании затвора. В табл.2 приведены значения изменения заряда ΔQ_f для экспериментальных структур, рассчитанные из ВФХ для участков окисла с Si^{*}-Al на поверхности и без затворной композиции.

Таблица 2
Изменение встроенного заряда ΔQ_f в окислах экспериментальных структур на различных участках поверхности

№ образца	Температура окисления, °С	Среда окисления	Заряд Q_f , образованный при окислении, нКл/см ²	ΔQ_f , нКл/см ²	
				на участке, свободном от Si [*] -Al	на участке с Si [*] -Al
1	850	Комбинированная	+50	-23	-35
2	1000		+50	-23	-35
3	1050	Сухой O ₂	+40	-24	+40
4	1050		+40	-24	+40

Из табл.2 видно, что в окисле всех образцов в результате процесса формирования затвора происходит уменьшение исходного положительного встроенного заряда. Это уменьшение, согласно [1], может быть связано с генерацией отрицательных электрически активных центров на внешней границе раздела $\text{SiO}_2\text{--Si}^*$, обусловленных природой взаимодействия слоя поликремния с диоксидом кремния при высокой температуре, природа которых пока неизвестна. Другой возможной причиной уменьшения исходного положительного заряда является проникновение атомарного водорода, которым пересыщена пленка поликремния [1], к границе раздела подложка–окисел и насыщение оборванных связей.

Следует отметить, что изменение ΔQ_f , рассчитанное для окислов, свободных от затворной композиции, слабо чувствительно к изменению режимов термического окисления.

Однако, как видно из табл.2, чувствительность ΔQ_f к режимам термического окисления значительно изменяется при наличии пленки Si^* на поверхности окисла. При этом для окислов, полученных в комбинированной среде, пленка поликремния приводит к относительно небольшому дополнительному уменьшению начального встроенного заряда, в то время как в пленках SiO_2 , выращенных в сухом O_2 , происходит существенное увеличение исходного положительного заряда.

В работах [2, 3] показано, что пленка поликремния может приводить к появлению дополнительных механических напряжений в окисле, вызывая изменение зарядовых характеристик SiO_2 . При этом, как известно, до формирования пленки поликремния в диоксиде кремния присутствуют внутренние механические напряжения, исходный уровень и характер распределения которых зависят от режимов окисления. Поэтому характер изменения исходных напряжений, вызванного пленкой поликремния, для различных окислов экспериментальных структур различается, что обуславливает разницу и в характере изменения встроенного заряда в диоксиде кремния.

Уровень механических напряжений в окисле, формируемый на этапе окисления, связан с процессом вязкого течения в SiO_2 , который характеризуется динамической вязкостью μ . При этом μ зависит от температуры и степени влажности среды окисления. Процесс вязкого течения обусловлен релаксацией механических напряжений и связан с поворотами кремний-кислородных тетраэдров. В зависимости от значения μ время релаксации механических напряжений τ_σ , рассчитывается по следующей формуле [5]:

$$\tau_\sigma = 3\mu/E,$$

где μ – динамическая вязкость [6], E – модуль Юнга для SiO_2 .

По значению величины k , представляющей отношение времени окисления t к времени релаксации внутренних механических напряжений в окисле τ_σ , можно судить о степени завершенности процесса релаксации напряжений в окисле по окончании термического окисления. В случае если $k < 1$, то напряжения не полностью срелаксированы. Если же $k \gg 1$, то релаксация механических напряжений прошла полностью [5]. В табл. 3 приведены расчеты значения k для окислов экспериментальных структур.

Как следует из табл.3, окисел, полученный комбинированным окислением (образцы № 1 и 2), находится в значительно более напряженном состоянии по окончании процесса окисления, чем сухой окисел образцов № 3 и 4, где релаксация внутренних механических напряжений прошла полностью.

Таблица 3

Значение $k = t/\tau_\sigma$ для окислов экспериментальных структур

№ образца	Температура окисления, °C	Среда окисления	Динамическая вязкость μ , МПа·с	Время релаксации τ_σ , с	k
1	850	Комбинированная	$3 \cdot 10^{10}$	$1,26 \cdot 10^5$	0,05
2	1000		$4 \cdot 10^8$	$1,59 \cdot 10^3$	0,7
3	1050	Сухой O ₂	$1 \cdot 10^8$	$4 \cdot 10^2$	14
4	1050		$1 \cdot 10^8$	$4 \cdot 10^2$	18

Увеличение внутренних механических напряжений должно приводить к увеличению структурных дефектов, ответственных за появление заряда Q_f [7]. Однако из табл.2 видно, что разница между напряженными по-разному окислами незначительна. По-видимому, это связано с тем, что энергия внутренних механических напряжений в окислах, полученных комбинированным окислением, не достигла уровня, при котором происходит дефектообразование и релаксация напряжений посредством генерации структурных дефектов.

Наличие пленки Si* на поверхности окисла приводит к изменению уровня и характера распределения внутренних механических напряжений в SiO₂ посредством генерации дополнительных напряжений. При этом в объеме напряженных окислов (№ 1 и 2) происходит компенсация исходных механических напряжений сжатия благодаря генерации напряжений обратного знака, что приводит к некоторому уменьшению концентрации точечных дефектов и, следовательно, незначительному уменьшению Q_f . Однако в случае изначально ненапряженных сухих окислов образцов № 3 и 4, генерация механических напряжений, вызванная пленкой Si*, приводит к появлению структурных дефектов и, соответственно, увеличению положительного встроенного заряда Q_f .

В результате проведенных исследований показано, что характер изменения электрофизических свойств системы кремний–окисел определяется как процессами генерации отрицательно заряженных электрически активных центров на внешней границе раздела окисел–затвор, так и процессами перераспределения внутренних механических напряжений в окисле, зависящего от исходного структурного состояния диоксида кремния, определяемого режимами термического окисления. Полученные результаты расширяют понимание процессов, происходящих в МОП-структурах с поликремниевым затвором. Внутренние механические напряжения, возникающие при формировании системы Si-SiO₂-Si*, необходимо учитывать при разработке технологии МОП ИС.

Литература

1. Урицкий В.Я. Формирование и электрофизические характеристики многослойных структур на основе системы кремний–диоксид кремния: Диссертация на соискание ученой степени д-ра физ.-мат. наук. – Санкт-Петербург, 1995. – 341 с.
2. Дракин К.А., Манжа Н.М., Патюков С.М., Чистяков Ю.Д. Стабилизация сопротивления пленок поликристаллического кремния при физикотермических воздействиях // Электронная промышленность. – 1988. – Вып. 7. – С. 35–38.

3. Глебов А.С., Зайцев Н.А., Манжа Н.М. Снижение величины эффективного заряда в МДП-структурах // Электронная промышленность. – 1994. – № 1. – С. 71, 72.
4. Зу С. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х кн. Кн. 1. – М.: Мир, 1984. – 455 с.
5. Sokolov V.I., Fedorovich N.A. Mechanical stresses on the Si-SiO₂ interface // Phys.stat.sol. (a) 99, 1987, P. 151–158.
6. Schaeffer H. Oxygen and silicon diffusion-controlled processes in vitreous silica // J.Non-Cryst.Sol. – 1980. – Vol. 38–39. – P. 545–550.
7. Денисенко А.И., Литвиненко С.А., Соколов В.И. Анализ элементарных процессов, протекающих при формировании структуры диэлектрик–полупроводник // Препринт ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, № 1469. – 1990. – 35 с.

Статья поступила
16 марта 2006 г.

Скворцов Альберт Матвеевич – доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. *Область научных интересов:* физика полупроводников, технология и конструирование изделий полупроводниковой интегральной микро- и нано-электроники.

Халецкий Роман Александрович – старший преподаватель кафедры проектирования компьютерных систем Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. *Область научных интересов:* технология и конструирование изделий полупроводниковой интегральной микро-электроники, радиационная стойкость полупроводниковых интегральных схем.

Соколов Владимир Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией диффузии и дефектообразования в полупроводниках Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе РАН. *Область научных интересов:* формирование и электрофизические характеристики межфазных границ, структурные дефекты в твердых телах, нанокompозитные материалы.

Информация для читателей журнала

«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Вы можете оформить подписку на 2007 г. в редакции с любого номера. Стоимость одного номера – 550 руб. (с учетом всех налогов и почтовых расходов).

Адрес редакции:

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

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

E-mail: magazine@rnd.miee.ru

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

Влияние пористости поверхностных слоев на жесткость подвеса чувствительного элемента МЭМС на основе структур КНИ

С.П.Тимошенков, С.А.Зотов, В.В.Калугин, А.А.Воротников, В.Г.Рубчиц

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Е.П.Прокопьев

ГНЦ Институт технической и экспериментальной физики (г. Москва)

Приведен анализ механизмов миграции пор и полостей на границе раздела в структурах кремний–на–изоляторе. Показано, что поры с радиусом до 30 мкм на границе раздела залечиваются в процессе термообработки структур, что способствует получению качественных приборов и микроэлектромеханических систем (МЭМС). Рассмотрено влияние поверхностных слоев на изгибную жесткость подвеса чувствительного элемента МЭМС.

Технологические процессы сращивания кремниевых пластин могут быть широко использованы для изготовления многослойных структур и микроэлектромеханических систем (МЭМС). Особое значение при изготовлении радиационно-стойкой элементной базы микроэлектроники и создании микроминиатюрных навигационных приборов и систем имеют оценки времен залечивания τ_c и времен движения пор до и от границ сращивания τ_L , зависящих от радиуса поры R_0 и расстояния от центра поры до границы кристалла L_0 [1–3]. Пустые поры ($P < 0$) движутся от границы сращивания в глубь неутоненной подложки, и их радиус уменьшается, стремясь к нулю. Поры с газом ($P > 0$) движутся от границы сращивания к поверхности утоненного слоя, и их радиус увеличивается до значения $R_0 \sim L_0$, после чего пора вскрывается. Очень малые поры с размерами $R_0 \leq 1$ мкм залечиваются за время менее 1 ч, а поры с размерами $R_0 \leq 10$ мкм – за несколько десятков часов. Очень большие времена залечивания свойственны порам с $R_0 \geq 30$ мкм. Оценки показали, что при низких температурах термообработки ($T \leq 100$ °C) скорости движения пор (микрополостей) резко уменьшаются, а времена залечивания τ увеличиваются на много порядков. Практический результат из проведенных оценок можно получить, рассматривая типичную конструкцию чувствительного элемента (ЧЭ) микромеханического вибрационного гироскопа LL-типа, приведенную на рис.1.

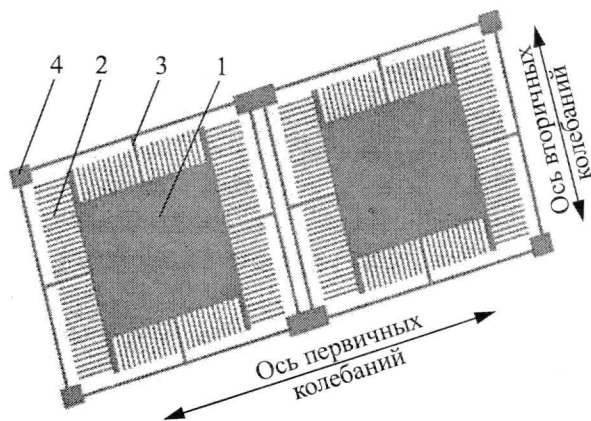


Рис.1. Чувствительный элемент микромеханического вибрационного гироскопа LL-типа: 1 – рамка; 2 – гребенка; 3 – подвес; 4 – опора

Для изготовления ЧЭ такого типа как в индивидуальном, так и в интегральном исполнении используются структуры КНИ с толщиной приборного слоя 5–30 мкм [4]. Очевидно, что крупные поры и полости с размерами порядка толщины приборного слоя недопустимы для изготовления всех элементов ЧЭ. В частности, наличие сквозных отверстий в рамках приведет к статическому дисбалансу рамок. Наличие крупных пор и полостей в области гребенок, образующих систему емкостных датчиков, приведет к выпадению отдельных зубьев гребенки и, как следствие, к дисбалансу возбуждающих и измерительных мостов схемы управления гироскопа. Отрицательные последствия использования структур КНИ с крупными порами и полостями заключаются в возможном нарушении целостности подвесов рамок. Учитывая размеры элементов ЧЭ, которые для гребенки составляют ~10 мкм, для подвеса ~100 мкм, можно сделать вывод, что поры и полости в структурах КНИ, предназначенных для изготовления ЧЭ, вообще недопустимы. В этом случае структуры КНИ или совсем не должны иметь пор и полостей либо иметь поры с такими размерами, которые могут быть залечены в результате термообработки в течение реального времени [5, 6]. Таким образом, для изготовления ЧЭ пригодны структуры КНИ с размерами пор не более 3–5 мкм.

Анализ показал, что газонаполненные поры стремятся в процессе термообработки к поверхности приборного слоя, после чего пора вскрывается. В этом случае поверхность ЧЭ может характеризоваться наличием раковин, а также более серьезных дефектов, связанных с растравом таких неоднородностей поверхности в процессе травления структуры. Поэтому для изготовления ЧЭ микромеханического вибрационного гироскопа пригодны структуры КНИ, сращивание которых осуществляется в условиях вакуума [7].

Рассмотренные элементы конструкции ЧЭ микромеханического вибрационного гироскопа характерны также для типичных конструкций микромеханических акселерометров. Результаты проведенного анализа могут быть использованы для конструкций ряда микромеханических гироскопов и акселерометров, изготавливаемых с применением структур КНИ. Отметим, что те же самые порядки величин скоростей движения и времен залечивания свойственны и включениям второй фазы (частицы пыли, преципитаты различных металлов, кремния и т.д.) на границе раздела сращиваемых пластин кремния. Помимо пор существенное влияние на параметры получаемых ЧЭ МЭМС оказывает наличие поверхностных слоев.

В общем случае структура ЧЭ датчика состоит из полупроводниковых, диэлектрических и проводящих слоев. Проанализируем влияние поверхностных слоев на изгибную жесткость подвеса ЧЭ микромеханического устройства. Уменьшение геометрических размеров ЧЭ микроприборов приводит к уменьшению размеров упругих подвесов. В силу этого возникает необходимость учета вклада, вносимого поверхностными слоями в упругие свойства самого подвеса. Следует также отметить, что изгибная жесткость подвеса любого микромеханического устройства является определяющим фактором, от которого зависят как динамические, так и статические характеристики данного устройства [8].

Рассмотрим кремниевую балку прямоугольного сечения, покрытую с четырех сторон поверхностным слоем (ПС), модуль Юнга которого отличается от модуля Юнга кремния (рис.2, 3). Балка представляет собой упругий подвес микромеханического устройства, например акселерометра, гироскопа или микродвигателя. Зависимость для из-

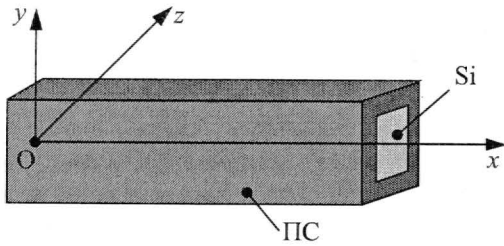


Рис.2. Элемент подвеса микромеханического устройства

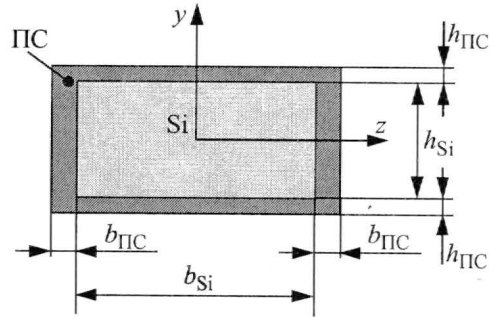


Рис.3. Общий случай расположения слоев

гибной жесткости балки прямоугольного сечения, покрытой слоями по периметру, имеет вид

$$B = E_{\text{Si}} \frac{b h_{\text{Si}}^3}{12} + E_{\text{ПС}} \left(b_{\text{Si}} \left(\frac{1}{2} h_{\text{Si}}^2 h_{\text{ПС}} + h_{\text{Si}} h_{\text{ПС}}^2 + \frac{2}{3} h_{\text{ПС}}^3 \right) + \frac{(h_{\text{Si}} + 2h_{\text{ПС}})^3 b_{\text{ПС}}}{6} \right),$$

где $E_{\text{Si}}, E_{\text{ПС}}$ – модули упругости первого рода соответственно монокристаллического кремния и поверхностного слоя; $b_{\text{Si}}, h_{\text{Si}}$ – толщины слоя кремния по разным направлениям (см. рис.3); $b_{\text{ПС}}, h_{\text{ПС}}$ – толщины поверхностного слоя по разным направлениям.

На рис.4 приведены графики зависимости изгибной жесткости балки B от различных толщин слоев $b_{\text{ПС}}$ и $h_{\text{ПС}}$ (в предположении $b_{\text{ПС}} = h_{\text{ПС}}$) для материалов слоев со следующими модулями упругости первого рода: $E_1 = 530$ ГПа – для пленок оксида алюминия в монокристаллическом состоянии; $E_2 = 380$ ГПа – для тонких пленок нитрида кремния (Si_3N_4), используемых в полупроводниковом производстве; $E_3 = 210$ ГПа – для пленок нитрида кремния, выращенных методом плазмохимического осаждения из газовой фазы; $E_4 = 75$ ГПа – для тонких пленок оксида кремния, используемых в микроэлектронике.

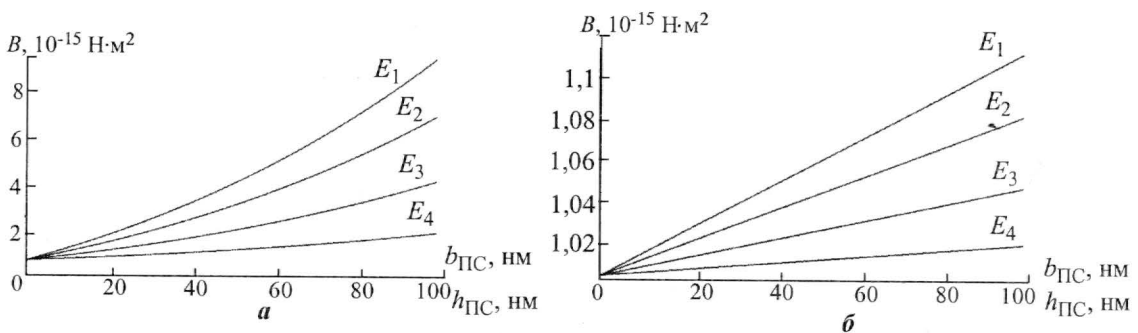


Рис.4. Зависимость изгибной жесткости балки от толщины слоя для параметров кремниевой балки: $b = 0,5$ мкм (а), $h_{\text{Si}} = 0,5$ мкм; $b = 30$ мкм, $h_{\text{Si}} = 30$ мкм (б)

Из приведенных результатов следует, что если геометрические размеры сечений кремниевой части балки и слоев отличны в несколько раз, то слои оказывают весьма существенное влияние на изгибную жесткость балки в целом (см. рис.4). Даже если это отличие более двух порядков, то поверхностные слои также будут оказывать влияние (до нескольких процентов) на изгибную жесткость балки.

Таким образом, при проектировании микромеханических приборов необходимо учитывать влияние, оказываемое поверхностными слоями на изгибную жесткость подвеса.

Литература

1. Физико-химические основы производства микромеханических чувствительных элементов гироскопов и акселерометров / **С.П.Тимошенков, В.В. Калугин, Е.П.Светлов-Прокопьев, В.И.Графутин** // Сб. научн. тр. Научн. сессии МИФИ-2004. IV Научн.-техн. конф. «Научно-инновационное сотрудничество». – М.: МИФИ, 2004. – Ч. 2. – С. 48, 49.
2. Технологии и методы исследования структур кремний на изоляторе / **Б.Ю.Богданович, В.И.Графутин, В.В.Калугин и др.** – М.: МИЭТ, 2003. – 288 с.
3. **Stengl R., Tan T., Goesele U.** A model for the silicon wafer bonding process // Japan J. Appl. Phys. – 1989. – Vol. 28, N 10. – P 1735–1741.
4. **Поголов А.И., Тимошенков В.П., Тимошенков С.П. Чаплыгин Ю.А.** Разработка микрогироскопов на основе многослойных структур кремния и стекла // Микросистемная техника. – 1999. – № 1. – С. 36–41.
5. **Гегузин Я.Е., Кривоглаз М.А.** Движение макроскопических включений в твердых телах. – М.: Металлургия, 1971. – 344 с.
6. **Тимошенков С.П., Прокопьев Е.П., Дягилев В.В.** О движении и залечивании пор и полостей вблизи границы сращивания стандартных пластин кремния // Изв. вузов. Электроника. – 1998. – № 5. – С. 39–44.
7. **Тимошенков С.П., Прокопьев Е.П.** Некоторые вопросы теории сращивания стандартных пластин кремния // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 1999. – № 3. – С. 35–44.
8. **Зотов С.А.** Расчет формы деформируемой балки в подвесе микромеханического акселерометра // Изв. ТулГУ. Сер. Проблемы специального машиностроения. – 2001. – Вып. 4. – С. 154–157.

Статья поступила
10 февраля 2006 г.

Тимошенков Сергей Петрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой микроэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* разработка технологических процессов формирования структур КНИ и элементов микромеханических устройств, синтез многокомпонентных материалов в ВЧИ-плазме.

Зотов Сергей Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры микроэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* аналитическая механика, расчет и проектирование механических узлов МЭМС.

Калугин Виктор Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры микроэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* разработка технологических процессов формирования структур КНИ и элементов микромеханических устройств, синтез многокомпонентных материалов в ВЧИ-плазме.

Воротников Алексей Александрович – студент МИЭТ.

Рубчиц Вадим Григорьевич – старший технолог кафедры микроэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* разработка технологических процессов формирования структур КНИ и элементов микромеханических устройств, синтез многокомпонентных материалов в ВЧИ-плазме.

Прокопьев Евгений Петрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ГНЦ ИТЭФ. *Область научных интересов:* исследования в области сложных систем, теории материаловедения и физических методов исследования материалов.

МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.382.3

Исследование $1/f$ -шума МДП-транзисторов с разным типом проводимости канала

А.А.Гваськов, Г.П.Жигальский, П.О.Ситкин

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Представлены результаты экспериментальных исследований $1/f$ -шума в n - и p -канальных МДП-транзисторах с индуцированным каналом, изготовленных по 1,2-мкм стандартному КМОП технологическому маршруту с затвором из поликристаллического кремния. Такие МДП-транзисторы используются для создания схем считывания сигнала с детекторов в двумерных приемниках ИК-излучения. Описана конструкция исследуемых МДП-транзисторов с индуцированным каналом. Выявлена зависимость уровня $1/f$ -шума МДП-транзисторов от типа проводимости канала. Установлено, что p -канальные МДП-транзисторы имеют уровень $1/f$ -шума примерно в 10 раз меньше по сравнению с n -канальными.

Основой большинства современных ИС, в том числе элементов двумерных приемников излучения (ДПИ) со схемами считывания, изготовленных с использованием КМОП-технологии, являются МДП-транзисторы. Собственные шумы налагают ограничения на чувствительность приемника и приводят к необходимости дополнительной обработки сигналов, формирующих видеоизображение [1]. Разработка схем считывания с низким уровнем собственных шумов позволила бы существенно улучшить характеристики ДПИ и получить более высококачественное изображение объекта, исследуемого с помощью ДПИ.

Цель настоящей работы – изучение шума вида $1/f$ (называемого также фликкер-шумом или избыточным шумом) в n - и p -канальных МДП-транзисторах, которые используются для создания элементов считывания в двумерных приемниках излучения.

Флуктуации напряжения и тока в твердых телах определяют чувствительность электронных приборов. Поэтому электрические шумы всегда стараются уменьшить. Кроме того, флуктуации содержат информацию о скрытых дефектах, что позволяет на основе анализа избыточных шумов осуществлять неразрушающий контроль качества МДП-транзисторов и ИС в целом [2].

Электрический шум может быть представлен беспорядочной последовательностью импульсов напряжения или тока, следующих друг за другом через случайные интервалы времени. Процесс со случайной последовательностью импульсов неперiodический. Тем не менее можно говорить о спектре такого процесса, понимая в данном случае под спектром распределение мощности по частотам. Для описания шумов вводится понятие спектральной плотности мощности (СПМ) шума [3]:

$$S(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{\Delta P(f)}{\Delta f} \text{ [Вт/Гц]}, \quad (1)$$

где $\Delta P(f)$ – усредненная по времени мощность шума в полосе частот Δf на частоте измерения f . В общем случае СПМ шума является функцией частоты. Зависимость СПМ шума от частоты называется энергетическим спектром.

На практике при оценке величины шума какого-либо элемента в ИС обычно измеряется среднеквадратичное шумовое напряжение $\overline{U^2}$ [В²] или среднеквадратичный ток $\overline{I^2}$ [А²]. При этом СПМ шума выражают в единицах В²/Гц или А²/Гц, а спектральные плотности флуктуаций напряжения $S_U(f)$ или тока $S_I(f)$ вычисляются по следующим формулам:

$$S_U(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{\overline{\Delta U^2}}{\Delta f}, \quad S_I(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{\overline{\Delta I^2}}{\Delta f},$$

где $\overline{\Delta U^2}$ и $\overline{\Delta I^2}$ – усредненные по времени напряжение шума и шумовой ток в полосе частот Δf соответственно.

Основные виды шумов в МДП-транзисторах. Основные источники шумов в МДП-транзисторах с индуцированным каналом – это тепловой шум подвижных носителей в канале и шум вида $1/f$, возникающий вследствие захвата (с последующей эмиссией) носителей заряда в канале на ловушки в оксиде [4].

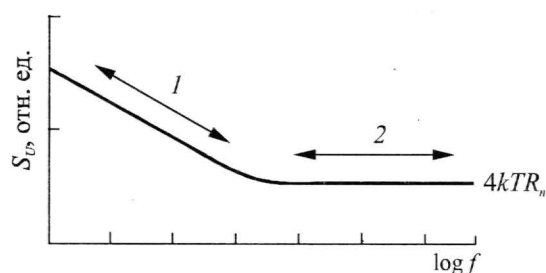


Рис.1. Типичная зависимость спектральной плотности флуктуаций напряжения S_U МДП-транзистора от частоты: область 1 – шум вида $1/f$; 2 – область теплового шума подвижных носителей в канале

На рис.1 представлена типичная зависимость спектральной плотности флуктуаций напряжения S_U МДП-транзистора от частоты f [4].

Как видно из рисунка, на высоких частотах S_U принимает наименьшее значение, определяемое тепловым шумом сопротивления канала R_n , в то время как на низких частотах S_U определяется шумом вида $1/f$.

Тепловой шум. Область 2 на рис.1 обусловлена тепловым шумом канала. Источник теплового шума в канале может быть представлен эквивалентным генератором напряжения шума, создаваемым сопротивлением

канала R_n , которое определяется следующей формулой [5, 6]:

$$R_n \approx \frac{2}{3g_m}, \quad (2)$$

где g_m – крутизна МДП-транзистора.

Данное значение сопротивления R_n используется для расчета напряжения теплового шума $\overline{U^2}$ в соответствии с формулой Найквиста [3]:

$$\overline{U^2} = 4kTR_n, \quad (3)$$

где k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; R_n – сопротивление канала, Ом.

Источниками теплового шума в МДП-транзисторе, кроме сопротивления канала, являются паразитные сопротивления истока и стока [7].

Следует отметить, что тепловой шум принципиально не может быть совсем устранен и служит тем пределом, ниже которого нельзя ослабить шумы в электронном приборе. Возникновение теплового шума связано с тепловым движением носителей тока, устранить которое полностью невозможно.

Шум вида $1/f$. На низких частотах наиболее важной составляющей шума в МДП-транзисторах является фликкер-шум (шум вида $1/f$). Фликкер-шум характеризуется спектральной плотностью мощности, которая пропорциональна $1/f^\gamma$, где γ – параметр формы спектра. Для многих приборов параметр γ принимает значения, близкие к единице, так что $0,8 < \gamma < 1,2$. Поэтому данный вид шума часто называют $1/f$ -шумом.

На низких частотах для МДП-транзисторов фликкер-шум может превышать уровень теплового шума в десятки–тысячи раз. $1/f^\gamma$ -шум ограничивает чувствительность и стабильность многих электронных устройств, требования к которым постоянно повышаются. Область 1 на рис.1 соответствует энергетическому спектру шума вида $1/f^\gamma$. В флуктуациях вида $1/f$ находят свое отражение электронные и атомные процессы в твердых телах, характеризующие особенности их микроструктуры. Это дает возможность использовать $1/f$ -шум для получения информации о качестве и надежности различных видов полупроводниковых приборов и ИС.

Как известно, в МДП-транзисторе процесс управления током стока I_C происходит на границе раздела двух разнородных материалов – диэлектрика и полупроводника. На границе раздела часто наблюдается высокая концентрация поверхностных состояний. Кроме того, диэлектрик содержит дефекты, создающие ловушки. Модуляция тока стока МДП-транзистора, возникающая при обмене носителями заряда в канале с поверхностными состояниями на границе раздела полупроводник–диэлектрик, а затем с ловушками в оксиде согласно модели Мак-Уортера [7, 8], приводит к возникновению $1/f$ -шума. Как известно, поверхностные состояния (ПС) имеют существенное значение для механизма управления транзистором. С увеличением плотности ПС возрастает и уровень $1/f$ -шума [8]. Поэтому всегда стремятся к уменьшению плотности поверхностных состояний.

Описание тестовых образцов МДП-транзисторов и экспериментальной установки. Исследования шумов проводились на МДП-транзисторах с одинаковыми размерами и разным типом проводимости канала, изготовленных в едином технологическом цикле на одной кремниевой пластине. Транзисторы выполнены по 1,2-мкм стандартному КМОП технологическому маршруту с затвором из поликристаллического кремния Si^* и металлизацией на основе сплава алюминия с кремнием, содержащим 1% кремния (сплав АК-1). Технология включает в себя набор из 10 стандартных фотолитографий. Толщина подзатворного диэлектрика SiO_2 составляет 25 нм.

Основные параметры тестовых МДП-транзисторов следующие: длина канала $L = 2$ мкм; ширина канала $W = 50$ мкм; пороговое напряжение $U_T = -0,6$ В (p -тип), $U_T = 0,6$ В (n -тип); количество исследованных образцов – по 9. Металлизация областей сток–исток и затвор выполнена на основе сплава АК-1. МДП-транзистор с каналом p -типа был сформирован в кармане n -типа с концентрацией донорной примеси (фосфор) 10^{16} см^{-3} .

Спектральная плотность мощности $1/f$ -шума на различных частотах анализировалась при помощи установки для измерения электрических шумов в МДП-транзисторах (рис.2).

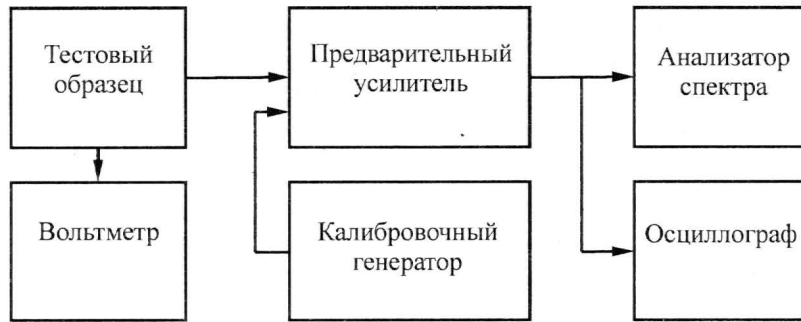


Рис.2. Структурная схема установки для измерения СПМ $1/f$ -шума в МДП-транзисторах

В состав измерительной установки входят: тестовый образец МДП-транзистора с контактным устройством, вольтметр, прибор для наблюдения статических характеристик МДП-транзистора (Л2-56), малошумящий предварительный усилитель, калибровочный генератор, анализатор спектра, осциллограф, предназначенный для наблюдения формы сигнала с последующим устранением помех. Данная установка позволяет решать комплекс задач по измерению и анализу шумов МДП-транзисторов.

Собственный шум предварительного усилителя много меньше исследуемых шумов (на частоте $f = 35$ Гц СПМ шума в режиме холостого хода $S_{xx} = 5,3 \cdot 10^{-16}$ В²/Гц, в режиме короткого замыкания СПМ шума $S_{кз} = 8,3 \cdot 10^{-18}$ В²/Гц) и не оказывал существенного влияния при измерениях. Суммарная погрешность измерений СПМ шума составляла не более 25–30% в зависимости от частоты.

Предварительный усилитель определяет чувствительность установки. При его создании решались такие важные задачи по конструктивному исполнению, как использование малошумящих пассивных элементов (сопротивлений, емкостей), правильное корпусирование (усилитель расположен в металлическом корпусе), исключение помех, проникающих по цепям питания, что достигнуто применением отдельного источника напряжения (питание усилителя осуществляется от набора гальванических элементов).

При воздействии шума со спектральной плотностью мощности $S(f)$ на усилитель с полосой пропускания Δf , настроенный на среднюю частоту f_0 , среднеквадратичное напряжение шума на выходе усилителя определяется выражением

$$\overline{U^2} = \int_{f_0 - \Delta f/2}^{f_0 + \Delta f/2} K^2(f) S(f) df, \quad (4)$$

где $K(f)$ – коэффициент передачи усилителя. Если выбрать полосу пропускания Δf вблизи частоты f_0 настолько узкой, чтобы в диапазоне частот $f_0 - \Delta f/2 \leq f \leq f_0 + \Delta f/2$ выполнялось $S(f) = S(f_0)$ и $K(f) = K(f_0)$, то из выражения (4) получим $\overline{U^2} = K^2(f_0) S(f_0) \Delta f$.

С учетом коэффициента усиления МДП-транзистора K_T при заданном режиме работы можно выразить СПМ собственного шума исследуемого МДП-транзистора на частоте f_0 , приведенную к его входу, через измеренное анализатором спектра среднеквадратичное напряжение шума $\sqrt{\overline{U^2}}$:

$$S(f_0) = \frac{\overline{U^2}}{K_T^2 K^2(f_0) \Delta f}, \quad (5)$$

где $\overline{U^2}$ – средний квадрат шумового напряжения вблизи частоты f_0 , измеренный при включенном МДП-транзисторе; $K(f_0)$ – коэффициент передачи измерительного тракта на частоте f_0 ; Δf – эффективная полоса пропускания анализатора спектра.

Экспериментальные результаты. Для оценки уровня тепловых шумов тестовых МДП-транзисторов был произведен теоретический расчет шумового напряжения $\overline{U^2}$ для n -канального и p -канального МДП-транзисторов при помощи выражения (3). Значение среднего квадрата шумового напряжения составляет: для n -канального транзистора $\overline{U^2} = 2,2 \cdot 10^{-17} \text{ В}^2/\text{Гц}$; для p -канального транзистора $\overline{U^2} = 6,7 \cdot 10^{-17} \text{ В}^2/\text{Гц}$. Следовательно, можно утверждать, что для исследуемых МДП-транзисторов уровень теплового шума по порядку величины составляет $10^{-17} \text{ В}^2/\text{Гц}$.

Проведены измерения шумов исследуемых образцов МДП-транзисторов в диапазоне частот $f = 35\text{--}425 \text{ Гц}$ (для области 1 на рис.1). Как уже отмечалось, в этой области преобладает шум вида $1/f$ над тепловым шумом. Результаты измерений СПМ шума на частоте $f = 35 \text{ Гц}$ приведены на рис.3 в виде диаграмм, из которых можно выявить МДП-транзисторы с максимальным и минимальным уровнем $1/f$ -шума.

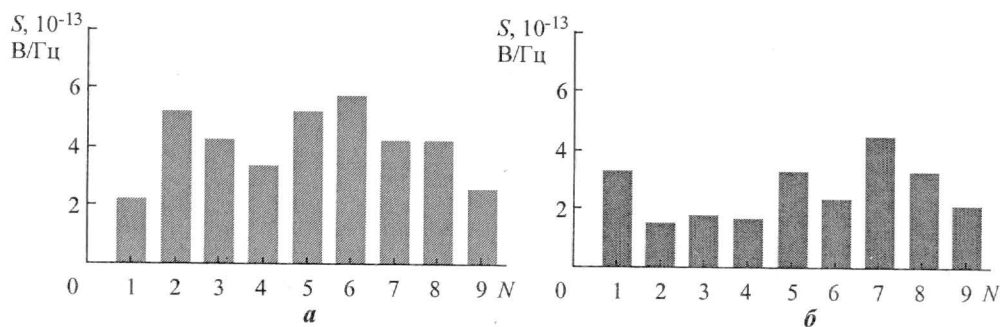


Рис.3. Диаграммы СПМ $1/f$ -шума для исследуемых МДП-транзисторов на частоте $f = 35 \text{ Гц}$ при токе стока $I_C = 1 \text{ мА}$: а – n -канальные; б – p -канальные (N – номер образца)

На рис.4 представлены приведенные ко входу транзистора (к затвору) усредненные зависимости СПМ шума от частоты для МДП-транзисторов с разным типом проводимости и одинаковыми геометрическими размерами ($W = 50 \text{ мкм}$, $L = 2 \text{ мкм}$). Для получения этих зависимостей экспериментальные результаты обрабатывались по методу наименьших квадратов на ЭВМ. Измерение шумовых характеристик МДП-транзисторов проводилось в области насыщения канала при одинаковом для всех образцов токе стока $I_C = 1 \text{ мА}$.

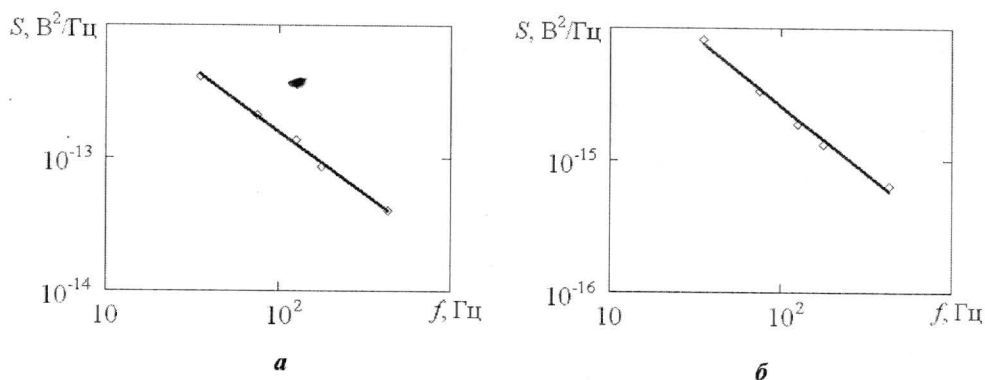


Рис.4. Усредненные зависимости приведенной ко входу СПМ $1/f$ -шума от частоты для МДП-транзисторов: а – n -канальные, б – p -канальные ($W = 50 \text{ мкм}$, $L = 2 \text{ мкм}$)

Как следует из рис.4, зависимости подчиняются закону $1/f^\gamma$. Сравнивая полученные значения на графиках, можно отметить, что для p -канальных транзисторов СПМ $1/f$ -шума в диапазоне частот $f = 35\text{--}425$ Гц в среднем на порядок меньше по сравнению с n -канальными. Объясняется это тем, что уровень Ферми в p -канальных транзисторах расположен глубже, чем в n -канальных. Это затрудняет процесс обмена носителей в канале с ловушечными центрами в диэлектрике. При этом вероятность туннелирования носителей тока из поверхностного канала на ловушки в оксиде уменьшается [8].

Аналогичные результаты были получены для p - и n -канальных МДП-транзисторов, изготовленных по 0,35-мкм КМОП технологическому маршруту [9].

Значения параметра формы спектра γ для исследованных МДП-транзисторов

№ образца	МДП-транзистор	
	n -канальный	p -канальный
1	0,8	1,5
2	1,1	1,2
3	1,1	1,1
4	0,8	1,3
5	1,0	1,2
6	1,0	1,0
7	0,9	1,5
8	1,0	1,2
9	0,9	1,2

Проведена оценка параметра формы спектра γ шума вида $1/f^\gamma$ для p -канальных и n -канальных МДП-транзисторов, изготовленных на одной пластине (таблица). Как видно из таблицы, некоторые транзисторы (n -канальные № 2, 3 и p -канальные № 1, 7) имеют повышенное значение параметра формы спектра γ , что может свидетельствовать о наличии скрытых дефектов, увеличивающих степень неравновесности их структуры, и указывать на потенциальную ненадежность этих транзисторов [10, 11].

Отметим, что в исследованных МДП-транзисторах аномально высокий уровень $1/f^\gamma$ -шума по пластине, превышающий средне-статистическое значение шума в несколько раз, не наблюдался. Это говорит об относительной стабильности технологических операций при производстве МДП-транзисторов.

На основании проведенных исследований получены следующие результаты.

Оценка теплового шума канала в исследуемых p -канальных и n -канальных МДП-транзисторах показала, что его уровень на частотах $f < 1$ кГц много меньше уровня $1/f$ -шума и составляет порядка 10^{-17} В²/Гц. Наименьшим уровнем $1/f$ -шума обладают p -канальные транзисторы. Для p -канальных транзисторов СПМ $1/f$ шума в диапазоне частот $f = 35\text{--}425$ Гц примерно на порядок меньше по сравнению с n -канальными. Благодаря наличию экспериментальных данных по собственным шумам МДП-транзисторов появилась возможность их учета при проектировании и исследовании ДПИ на основе схем считывания, выполненных по КМОП-технологии.

Литература

1. Focal-plane-arrays and CMOS readout techniques of infrared imaging systems / *Chih-Cheng Hsieh, Chung-Yu Wu, Far-Wen Jih et al.* // IEEE Transactions on circuits and systems for video technology. – 1997. – Vol. 7, N 4. – P. 594–605.
2. *Жигальский Г.П.* Неразрушающий контроль качества интегральных микросхем по электрическим шумам и параметрам нелинейности / Радиотехника и электроника. – 2005. – Т. 50, № 5. – С. 517–551.
3. *Букингем З.М.* Шум в электронных приборах и системах. – М.: Мир, 1986. – 398 с.

4. **Motchenbacher C.D., Connely J.A.** Low-noise electronic system design. – A wiley-interscience publication, john wiley and sons, Inc. New York, 1993. – 422 p.
5. **Van der Ziel A.** Thermal noise in field effect transistors // Proc. IEEE. – 1962. – Vol. 50, N 8. – P. 1808–1812.
6. **Van der Ziel A.** Gate noise in field effect transistors at moderately high frequencies // Proc. IEEE. – 1963. – Vol. 51, N 3, – P. 461–467.
7. **Майоров С.А.** Полевые транзисторы. Физика, технология и применение. – М.: Сов. радио, 1971. – С. 176–190.
8. **Жигальский Г.П.** Избыточные шумы в структурах металл–диэлектрик–полупроводник// Радиотехника и электроника. – 1999. – Vol. 44, №.12. – С. 1–18.
9. **Sakalas P., Zirath H., Litwin A. and Schröter M.** On-wafer low frequency noise investigation of the 0,35 μm n and p type, dependence upon the gate geometry// In Proc. 16th Intern. Conference «Noise in physical systems and $1/f$ fluctuation» (Gainesville, Florida, USA). – World scientific, 2001. – P. 157–160.
10. **Жигальский Г.П.** Шум вида $1/f$ и нелинейные эффекты в тонких металлических пленках // УФН. 1997. – Vol. 167, №6. – С. 623–648.
11. **Жигальский Г.П.** Неравновесный $1/f'$ -шум в проводящих пленках и контактах// УФН. – 2003. – Vol. 173, № 5. – С. 465–490.

Статья поступила 19 июня 2006 г.

Гваськов Алексей Александрович – аспирант кафедры интегральной электроники и микросистем МИЭТ. *Область научных интересов:* разработка и изготовление ИС для ИК-техники.

Жигальский Геннадий Павлович – профессор кафедры интегральной электроники и микросистем МИЭТ. *Область научных интересов:* электрические шумы в твердотельных электронных приборах.

Ситкин Павел Олегович – аспирант кафедры философии и социологии МИЭТ. *Область научных интересов:* динамическая теория информации, теория катастроф, синергетика.

Уважаемые читатели!

К 10-летию научно-технического журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника» выпущен компакт-диск с полными версиями всех номеров за 2006 год.

На диске размещены печатные версии статей в формате PDF. Для просмотра статей требуется программа Adobe Acrobat Reader версии 3.0 и выше.

Оформить заказ можно в редакции.

Адрес редакции: 124498, г. Москва, Зеленоград,
проезд 4806, д.5, МИЭТ, комн. 7232.
Тел.: (495) 534-6205
Факс: (495) 530-54-29
E-mail: magazine@rnd.miee.ru

Оптический сенсор для определения аммиака в воздухе

О.М.Иванова, С.А.Крутоверцев

ОАО «Практик-НЦ» (г. Москва)

В.А.Анисимов, А.Г.Борисов, Т.Д.Чиликина

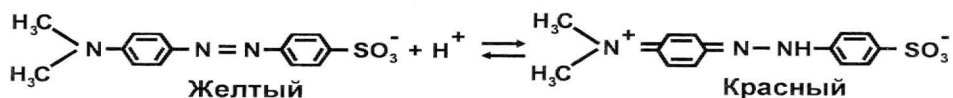
**Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)**

Рассмотрена кинетика взаимодействия аммиака с пленкой нафiona, содержащей *n*-(*n*-диметиламинофенилазо)бензолсульфонат натрия. Проведена оценка некоторых параметров оптического сенсора на основе этой структуры.

Загрязнение окружающей среды и ужесточение законодательства по ее охране предъявляют новые требования к точности и чувствительности газовых сенсоров для регистрации и измерения концентрации токсичных газов в атмосфере, например аммиака. Известно, что некоторые органические вещества при комнатной температуре чувствительны к неорганическим и органическим газам при достаточно низком их содержании в воздухе. В настоящее время ряд этих веществ является объектом научных исследований с целью возможного их применения в химических сенсорах нового поколения. Это в первую очередь относится к соединениям с развитой системой сопряжения: органическим красителям, проводящим полимерам, таким как полианилин, полипиррол, политиофен и их производным [1–7], фталоцианиновым комплексам различных металлов [8, 9] и некоторым другим. Так как аммиак обладает ярко выраженными основными свойствами, следует ожидать, что он будет активно и обратимо реагировать с органическими красителями, проявляющими кислотные или амфотерные свойства. При этом результатом такого взаимодействия станет изменение оптических характеристик (спектра поглощения, показателя преломления и характера его дисперсии) красителя, которые можно зафиксировать приборными методами.

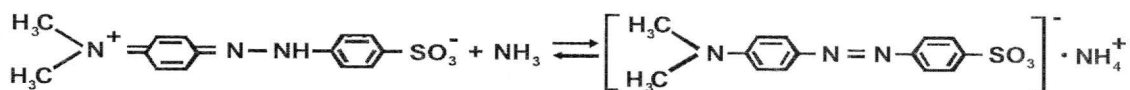
Использование метода нарушенного полного внутреннего отражения позволяет надежно зафиксировать изменения в оптических характеристиках сверхтонких пленок, нанесенных на боковую поверхность изогнутого цилиндрического волновода [10]. Как показывает опыт, одним из способов формирования тонкой однородной пленки органического красителя на поверхности такого волновода является включение молекул красителя в состав подходящей инертной матрицы. Исходя из характера процессов, приводящих к изменению оптических свойств красителя и возможности регистрации этих изменений, вещество матрицы должно отвечать следующим основным требованиям: обладать хорошими пленкообразующими свойствами, быть прозрачным в области используемых длин волн излучения, гидрофильным, хорошо растворять органический краситель. В качестве такой матрицы выбран нафion. Нафion (Nafion®) – растворимый фторзамещенный полимерный катионит, имеющий хорошие пленкообразующие свойства, прозрачный в видимом диапазоне спектра. Пленки нафiona формируются из этанольных или водно-этанольных растворов. Они гидрофильны и однородны по своей

структуре. Концентрация подвижных катионов водорода в пленке Н-формы катионита составляет $\sim 1,5 \text{ М}$ [11]. Исходя из свойств нафiona, а также для определения аммиака при его содержании в воздухе в диапазоне 0,1–10 ПДК в качестве чувствительного материала выбран азокраситель *n*-(*n*-диметиламинофенилазо)бензолсульфонат натрия (метилоранжевый, метилоранж, гелиантин, оранже III), который относится к амфотерным кислотно-основным индикаторам и в водных растворах изменяет окраску от красной ($\lambda_{\text{max}} = 522 \text{ нм}$) до оранжево-желтой ($\lambda_{\text{max}} = 464 \text{ нм}$) при изменении pH раствора от 3,1 до 4 [12]. В водно-этанольном растворе, содержащем нафion и метилоранж, равновесие между двумя формами красителя сдвинуто вправо:



Поэтому пленка нафiona, содержащая краситель, исходно окрашена в красный цвет.

Аммиак, присутствующий в воздухе, обратимо взаимодействует с молекулами красителя по следующей схеме:



При этом спектр поглощения пленки смещается в синюю область. Это смещение тем больше, чем выше содержание аммиака в воздухе.

Аппаратура и методика измерений.

Конструктивно оптический сенсор состоит из чувствительного элемента и измерительного блока (рис.1). Физический принцип действия чувствительного элемента сенсора основан на том, что потери света в оптическом волноводе при прочих равных условиях зависят от показателя преломления и коэффициента экстинкции среды, в которую он помещен. Для повышения чувствительности и селективности определения аммиака на боковую поверхность волновода наносится пленка нафiona, содержащая *n*-(*n*-диметиламинофенилазо)бензолсульфонат натрия. Таким образом, волновод выступает в качестве трансдюсера, передающего информацию об изменении оптических свойств пленки на измерительный блок.

Основу чувствительного элемента оптического сенсора составляет кварцевый цилиндрический волновод 1 относительно большого диаметра (1,5 мм), изогнутый по радиусу 3 мм при длине прямых участков 40 мм. Использование волноводов такого диаметра упрощает систему ввода-вывода излучения. В торец волновода через свето-

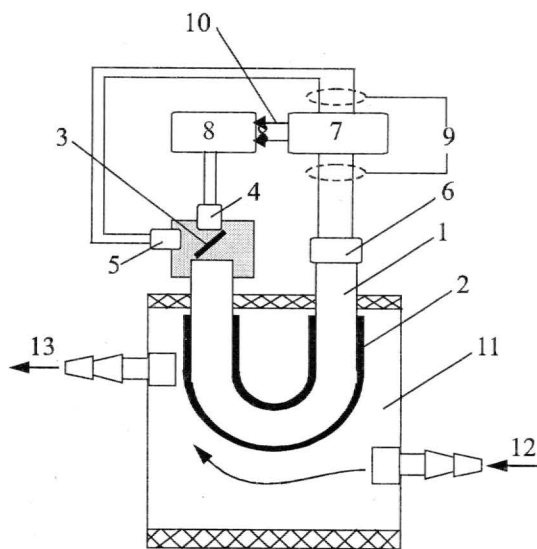


Рис.1. Принципиальная схема оптического сенсора: 1 – цилиндрический оптический волновод; 2 – пленка чувствительного вещества на боковой поверхности волновода; 3 – светодиодное устройство; 4 – источник света; 5 – опорный фотоприемник; 6 – измерительный фотоприемник; 7 – измерительный блок; 8 – блок питания источника света; 9 – каналы регистрации сигналов фотоприемников; 10 – канал обратной связи; 11 – проточная газовая камера; 12, 13 – входной и выходной патрубки

делительное устройство 3, представляющее собой стеклянную пластинку, закрепленную под углом 45° , на поверхность которой нанесена полупрозрачная пленка алюминия, направляется свет от стабилизированного источника излучения 4. При этом часть исходного светового потока от светоделительного устройства попадает на вход опорного фотоприемника 5, закрепленного перпендикулярно оси волновода. На входном прямом и изогнутом участках волновода в зависимости от оптических характеристик пленки (показателя преломления, коэффициента экстинкции) происходит уменьшение интенсивности светового потока из-за частичного вытекания света в окружающую среду. Далее свет, пройдя прямой выходной участок, который коллимирует оставшееся в волноводе излучение, попадает на выходной торец и регистрируется измерительным фотоприемником 6. Сигнал опорного фотоприемника применяется для поддержания постоянной интенсивности светового потока на входном торце волновода.

В качестве источника света использовался светодиод марки L-53 GSBT ($\lambda_{\max} = 530$ нм), максимум интенсивности излучения которого приходится на полосу поглощения протонированной формы красителя ($\lambda_{\max} = 522$ нм). Он подсоединялся к стабилизированному источнику питания 8, ток на выходе которого в зависимости от сигнала опорного фотоприемника плавно регулировался в диапазоне 0–25 мА и поддерживался с точностью $\pm 0,1\%$.

В качестве опорного и измерительного фотоприемников применялись кремниевые фотодиоды марки ФД-256. Сигналы с фотоприемников поступали на вход измерительного блока 7. Измерительный блок сенсора предназначен для цифровой обработки аналитического сигнала и определения по его величине содержания аммиака в атмосфере. Он состоит из усилителей постоянного тока с регулируемым коэффициентом усиления в диапазоне $1-10^5$, предназначенных для усиления сигналов фотоприемников, аналого-цифрового преобразователя, программируемого микропроцессора, обеспечивающего обработку аналитического сигнала, блока памяти, позволяющего записывать результаты измерений сразу по двум каналам, ЖК индикаторного устройства для вывода информации, блока сопряжения с персональным компьютером. Измерительный блок позволяет измерять сигнал на выходе чувствительного элемента сенсора с интервалом от 2 до 600 с, причем в указанном диапазоне интервал может задаваться с шагом в 2 с. Результаты измерений могут записываться в 16 регистрах (по выбору). При этом емкость каждого регистра составляет 256 значений измеряемой величины.

Результаты измерений, хранящиеся в памяти измерительного блока, в любой заданной последовательности регистров с помощью последовательного интерфейса связи RS-232 могут передаваться на персональный компьютер для дальнейшей обработки (например, построения графиков).

Газовые смеси с заданной концентрацией (1, 5, 20, 100 и 200 ppm аммиака в воздухе соответственно) и относительной влажностью готовились с использованием генератора газовых смесей «EnviroNics-4000» на основе тестовых ампул фирмы «Dräger». Все измерения проводились при комнатной температуре.

Перед каждой серией измерений в газовую камеру подавался воздух, относительная влажность и температура которого соответствовали влажности и температуре исследуемых газовых смесей, и при отключенном источнике света в течение 10 мин с интервалом в 2 с записывалось значение фоновое сигнала на выходе опорного и измерительного фотоприемников. В процессе исследований в газовую камеру в течение определенного интервала времени последовательно подавались воздух и исследуемая газовая смесь, относительная влажность и температура которых поддерживались оди-

наковыми. Измерения заканчивались на стадии, когда газовая камера заполнялась воздухом. Сигнал сенсора U рассчитывается по формуле

$$U = \frac{U_i - \bar{U}_{i,\text{фон}}}{U_0 - \bar{U}_{0,\text{фон}}}, \quad (1)$$

где U_i , U_0 – значение сигнала в исследуемом газе; $\bar{U}_{i,\text{фон}}$, $\bar{U}_{0,\text{фон}}$ – среднее значение фоновых сигналов измерительного и опорного фотоприемников соответственно.

Относительное изменение сигнала сенсора определяется как

$$U_{\text{отн}} = \frac{U - U_{\text{в}}}{U_{\text{в}}}, \quad (2)$$

где $U_{\text{в}}$ – сигнал сенсора на воздухе.

Расход газа через камеру определялся стандартным ротаметром, подключенным к выходному патрубку. Относительная влажность и температура газа контролировались прибором ИВТМ-7 с проточной камерой с точностью $\pm 2\%$ по относительной влажности и $0,5^\circ\text{C}$ по температуре.

Статистическая обработка результатов проводилась с использованием программного продукта «Microsoft Excel».

Пленка нафiona, содержащая метилоранж, наносилась на боковую поверхность волновода из раствора методом окунаия. Раствор готовился на основе 5%-ного по массе раствора нафiona в этаноле (Н-форма, «Aldrich», США) разбавлением последнего деионизованной водой в отношении 1:9 по объему и добавлением до насыщения n -(n -диметиламинофенилазо)бензолсульфоната натрия (сда, «Лаверна»). После формирования пленки волновода сушились на воздухе при комнатной температуре в течение 24 ч.

Аналогичным методом пленка формировалась на поверхности предметного стекла, а затем толщина пленки определялась с помощью профилометра марки «ALPHA-STEP 200» (разрешение по вертикали до 0,4 нм). Для разных образцов она менялась в диапазоне 100–150 нм.

Результаты и их обсуждение. Первые измерения показали, что сенсор обратимо и воспроизводимо реагирует на присутствие аммиака в воздухе после предварительной тренировки чувствительного элемента сенсора в атмосфере аммиака. В этот период сигнал сенсора практически не меняется (рис.2), так как аммиак в первую очередь реа-

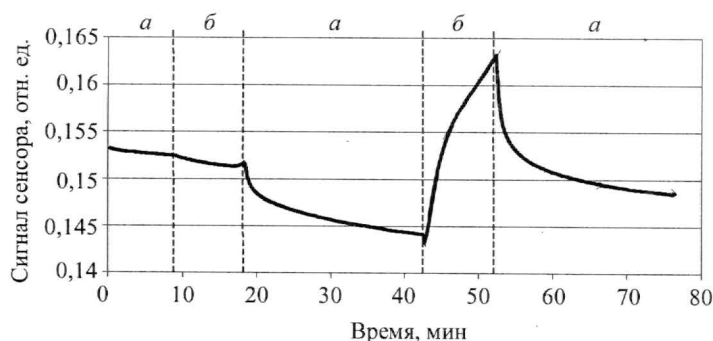


Рис.2. Зависимость сигнала сенсора от времени при циклическом напуске в газовую камеру воздуха: а – воздух; б – воздух, содержащий 20 ppm аммиака

гирует с избыточными ионами водорода матрицы с образованием катионов NH_4^+ . И только после полного насыщения материала матрицы начинается обратимая реакция аммиака с метилоранжем, которая приводит к соответствующему изменению сигнала. Эксперимент показал, что достаточно 10-минутной выдержки волновода после формирования на его поверхности пленки в воздухе, содержащем 20 ppm аммиака, чтобы в дальнейшем сигнал сенсора приобрел обратимый и воспроизводимый характер (см. рис.2).

Сигнал сенсора закономерно увеличивается при увеличении содержания аммиака в воздухе от 1 до 100 ppm (рис.3). При концентрации аммиака свыше 100 ppm амплитуда сигнала остается практически неизменной.

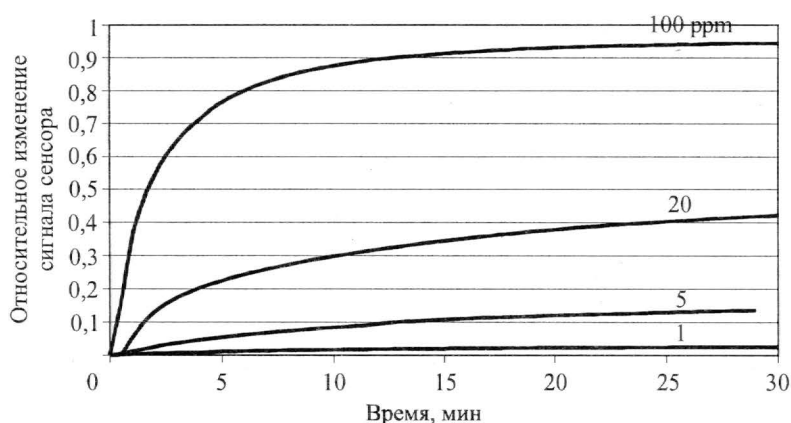


Рис.3. Зависимость сигнала сенсора от времени для различных концентраций аммиака в воздухе (относительная влажность воздуха – 50%)

Передний фронт сигнала (см. рис.3) хорошо описывается функцией

$$U_{\text{отн}} = A_1[1 - \exp(-k_1 t)] + A_2[1 - \exp(-k_2 t)]. \quad (3)$$

Здесь k_1 и k_2 линейно зависят от содержания аммиака в воздухе, по крайней мере в диапазоне концентраций 1–200 ppm (рис.4).

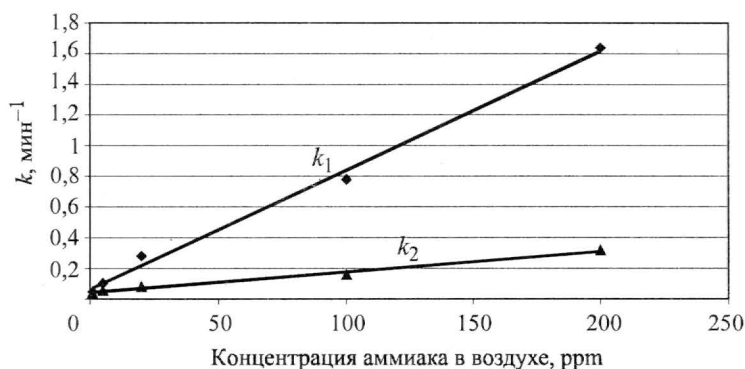


Рис.4. Зависимость параметров k_1 и k_2 от содержания аммиака в воздухе при относительной влажности воздуха 50%

Параметры A_1 , A_2 , k_1 и k_2 (3) определялись по кинетическим кривым (см. рис.3) методом наименьших квадратов. Значения их представлены в таблице.

Значения параметров A_1 , A_2 , k_1 и k_2

Концентрация аммиака в воздухе, ppm	A_1	A_2	k_1 , мин ⁻¹	k_2 , мин ⁻¹
1	0,010	0,015	0,045	0,037
5	0,015	0,139	0,101	0,052
20	0,178	0,306	0,278	0,077
100	0,564	0,353	0,778	0,159
200	0,573	0,366	1,638	0,315

Существенное различие в значениях k_1 и k_2 указывает на то, что первое слагаемое уравнения (3), вероятно, описывает кинетику процессов, происходящих на поверхности, тогда как второе характеризует процессы в объеме пленки.

Установлено также, что k_1 сильно зависит от влажности воздуха и уменьшается с уменьшением последней. Так, например, при концентрации аммиака в воздухе 20 ppm уменьшение влажности воздуха от 65 до 5% приводит к более чем 3-кратному уменьшению k_1 . При этом k_1 и k_2 становятся близки по значению.

Уменьшение относительной влажности воздуха ниже 15% также приводит почти к двукратному увеличению времени восстановления сигнала сенсора.

Таким образом, быстродействие сенсора лимитируется процессами массопереноса аммиака на поверхности и в объеме пленки. Наличие на поверхности пленки адсорбированной влаги ускоряет процессы адсорбции-десорбции и перенос молекул аммиака на поверхности, но практически не влияет на скорость диффузии в объеме.

Литература

1. Miasik J.J., Hooper A., Tofield B.C. Conducting polymer gas sensors // J. Chem. Soc. Faraday Trans. – 1986. – Vol. 1, N 82. – P. 1117 – 1126.
2. Hanawa T., Kuwabata S., Yoneyama H. Gas sensitivity of polypyrrol films to NO₂ // J. Chem. Soc. Faraday Trans. – 1988. – Vol. 1, N 84. – P. 1582–1592.
3. Tuyen T.T., Potje-Kamloth K., Liess H.-D. Electrical properties of doped polypyrrole/silicon heterojunction diodes and their response to NO_x gas // Thin Solid Films. – 1977. – N 292. – P. 293–298.
4. Fabrication and characterization of polyaniline-based gas sensor by ultra-thin film technology / D.Xie, Y.Jiang, W.Pan et. al. // Sens. Actuators B. Chem. – N 81. – 2002. – P. 158–164.
5. Agbor N.E., Cresswell J.P., Petty M.C., Monkman A.P. An optical gas sensor based on polyaniline Langmuir – Blodgett films // Sens. Actuators B. Chem. – 1997. – N 41. P. 137–141.
6. Barker P.S., Monkman A.P., Petty M.C., Pride R. Electrical characteristics of a polyaniline/silicon hybrid field-effect transistor gas sensor // IEE Proc. Circuits Devices Syst. – 1997. – N 144. – P. 111–116.
7. Interaction of planar polymer Schottky barrier diodes with gaseous substances / A.Assadi, A.Spetz, M.Willander et. al. // Sens. Actuators B. Chem. – 1994. – N 20. – P. 71–77.
8. Liu C.J., Hsieh J.C., Ju Y.H. Response characteristics of lead phthalocyanine gas sensor: effect of operating temperature and postdeposition annealing // J. Vac. Sci. Technol. – 1996. – N 14. – P. 753–756.
9. Hu W., Liu Y., Liu S., Zhu D. The response mechanism of aminotri-tert-butylphthalocyanin thin films to nitrogen dioxide, Thin Solid Films. – 1998. – N 324. – P. 285–291.
10. Ultra-thin films usage in optic sensors of different assignment / S.A.Krutovertsev, A.G.Borisov, E.D.Sudakov et. al. // Fifth ISTC Scientific Advisory Committee Seminar «Nanotechnologies in the area of physics, chemistry and biotechnology» (St-Petersburg, Russia, May 27–29, 2002). – 2002. – P.
11. Zinger B., Shier P. Spectroscopic studies of cationic dyes in Nafion®. Preliminary investigation of a new sensor for hydrophilic contamination in organic solvents // Sensors and Actuators B N 56. – 1999. – P. 206–214.

12. Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1989. – 448 с.

Статья поступила 26 апреля 2006 г.

Иванова Ольга Михайловна – кандидат химических наук, начальник отдела разработки сенсоров ОАО «Практик-НЦ» (г. Москва). *Область научных интересов:* чувствительные слои газовых сенсоров.

Крутоверцев Сергей Аркадьевич – кандидат технических наук, генеральный директор ОАО «Практик-НЦ» (г. Москва). *Область научных интересов:* разработка и производство сенсоров влажности, газовых сенсоров и приборов контроля на их основе.

Анисимов Василий Александрович – аспирант кафедры общей химии и экологии МИЭТ. *Область научных интересов:* разработка газовых сенсоров.

Борисов Александр Григорьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры общей химии и экологии МИЭТ. *Область научных интересов:* оптические сенсоры.

Чиликина Татьяна Дмитриевна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела содействия научным исследованиям МИЭТ. *Область научных интересов:* материалы электронной техники.



Издательско-полиграфический комплекс
Московского государственного института электронной техники
информирует



Вышло в свет учебное пособие

В.А. Галкин

Мобильные системы радиосвязи



ISBN 5-7256-0438-1
Формат 60 x 84 1/16,
объем 100 с.: ил.

Рассмотрены функциональная схема и методы реализации полностью цифрового приемника сигналов с цифровой линейной и нелинейной модуляцией. Изложены основные алгоритмы оптимального и субоптимального детектирования, частотной и тактовой синхронизации, которые реализуются программно в baseband-процессоре приемника. Все алгоритмы оптимального приема представлены как программная реализация функции максимального правдоподобия. Параллельно рассматриваются эвристические алгоритмы, позволяющие реализовать субоптимальный прием с минимальными требованиями к процессору.

Пособие предназначено для студентов старших курсов, обучающихся по радиотехническим специальностям, оно также может быть полезно для аспирантов соответствующих специальностей и инженеров, работающих в области мобильных сетей радиосвязи.

НАНОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.38.029:621.315.5/.6

Методика измерения электропроводности нанометровых металлических пленок в слоистых структурах по спектрам отражения электромагнитного излучения

Ю.А. Чаплыгин

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.В. Абрамов, А.С. Боголюбов

Саратовский государственный университет им. Н.Г.Чернышевского

Предложена и экспериментально реализована методика измерения электропроводности и толщины металлических пленок в слоистых структурах в диапазоне толщин от единиц до тысяч нанометров по спектрам отражения электромагнитного излучения.

При обработке технологии создания слоистых структур на основе нанометровых металлических пленок, используемых в микро-, акусто- и оптоэлектронике, важно точно измерить толщину слоя металла и его электропроводность по завершении технологического цикла. Такие измерения желательно проводить, не разрушая структуру, например с использованием микроволнового излучения [1–4].

Для определения толщины и электропроводности нанометровых металлических пленок в слоистых структурах можно использовать результаты измерений спектров отражения и прохождения взаимодействующего с ними микроволнового излучения при условии, что известно их теоретическое описание [5–8]. Нахождение электрофизических параметров слоистых структур по спектрам отражения и прохождения электромагнитной волны связано с необходимостью решать обратную задачу. Высокая точность измерений достигается при условии, что известно теоретическое описание спектров отражения и прохождения, хорошо согласующееся с экспериментом, и эти спектры характеризуются высокой чувствительностью к изменению величин искомых параметров [6, 7].

В [8] определены электропроводность σ_m и толщина t_m металлической пленки, нанесенной на полупроводниковую подложку, по величине фазового сдвига между отраженными от полупроводниковой подложки и металлической пленки электромагнитными волнами оптического диапазона и коэффициенту пропускания электромагнитной волны СВЧ-диапазона на фиксированных частотах через исследуемую структуру. Однако при толщинах металлической пленки больше 100 нм мощность прошедшей через исследуемую структуру электромагнитной волны СВЧ-диапазона ослабляется более чем на 40 дБ (поэтому при измерениях необходимо проведение высокоточной юсти-

ровки измерительного тракта, применение прецизионной измерительной аппаратуры), а также затрудняется использование стандартных СВЧ-методик, что приводит к существенным погрешностям при измерении электропроводности металлической пленки. Использование в качестве информативного параметра коэффициента отражения электромагнитной волны СВЧ-диапазона от исследуемой структуры [7], значение которого при толщинах металлической пленки 100 нм и больше составляет более 0,95, также затруднено. Причина в том, что при использовании стандартных методик измерений, погрешность не превышает 10%, если коэффициент отражения меньше 0,7.

В настоящей работе приведены результаты исследования возможности реализации методики измерения толщины и электропроводности входящих в состав слоистых структур металлических пленок в диапазоне толщин от единиц до тысяч нанометров по спектрам отражения электромагнитного излучения.

Определение коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны через многослойную структуру. Расчетные соотношения. Будем считать, что измеряемая структура толщиной t состоит из металлического слоя толщиной t_m с электропроводностью σ_m и подложки толщиной t_n с электропроводностью σ_n (рис.1).

Коэффициенты прохождения R и отражения T электромагнитной волны, взаимо-

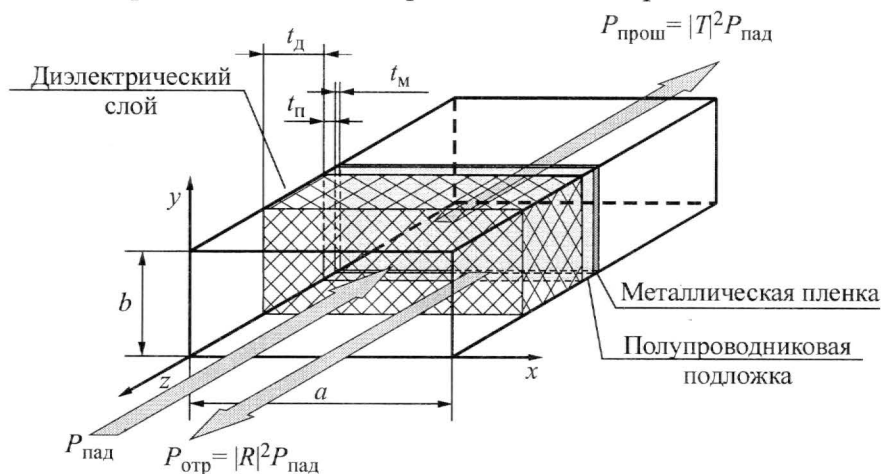


Рис.1. Расположение измеряемой структуры в волноводе ($P_{\text{пад}}$, $P_{\text{отр}}$ и $P_{\text{прош}}$ – СВЧ-мощности падающей, отраженной и прошедшей электромагнитной волны)

действующей с полупроводниковой пластиной (подложкой) с нанесенным на нее металлическим слоем, определяются как электропроводностью и толщиной металлического слоя, так и электропроводностью, толщиной и диэлектрической проницаемостью подложки. Для увеличения диапазона изменения величин R и T с изменением частоты в выбранном диапазоне частот (8–12 ГГц) перед исследуемой структурой размещался слой диэлектрика (толщиной t_d) (см. рис.1).

Для расчета частотной зависимости коэффициентов отражения $R(\omega, t_m)$ и прохождения $T(\omega, t_m)$ структуры, состоящей из трех слоев ($N=3$), могут быть использованы выражения

$$R = -\frac{T_N[2,1]}{T_N[2,2]}, \quad (1)$$

$$T = \frac{T_N[1,1]T_N[2,2] - T_N[1,2]T_N[2,1]}{T_N[2,2]}, \quad (2)$$

в которых элементы $T_3[1,1]$, $T_3[1,2]$, $T_3[2,1]$ и $T_3[2,2]$ матрицы передачи T_3 трехслойной структуры определяются из соотношения

$$T_3 = \begin{pmatrix} T_3[1,1] & T_3[1,2] \\ T_3[2,1] & T_3[2,2] \end{pmatrix} = \prod_{j=3}^0 T_{j(j+1)} = T(z_{3,4})T(z_{2,3})T(z_{1,2})T(z_{0,1}). \quad (3)$$

Выбрав в качестве начала отсчета поверхность диэлектрического слоя, на который падает электромагнитная волна (см. рис.1), имеем $z_{0,1} = 0$, $z_{1,2} = t_d$, $z_{2,3} = t_d + t_m$, $z_{3,4} = t_d + t_m + t_p$,

$$T(z_{0,1} = 0) = \begin{pmatrix} \frac{\gamma_d + \gamma_0}{2\gamma_d} & \frac{\gamma_d - \gamma_0}{2\gamma_d} \\ \frac{\gamma_d - \gamma_0}{2\gamma_d} & \frac{\gamma_d + \gamma_0}{2\gamma_d} \end{pmatrix},$$

$$T(z_{1,2} = t_d) = \begin{pmatrix} \frac{\gamma_m + \gamma_d}{2\gamma_m} e^{(\gamma_m - \gamma_d)t_d} & \frac{\gamma_m - \gamma_d}{2\gamma_m} e^{(\gamma_m + \gamma_d)t_d} \\ \frac{\gamma_m - \gamma_d}{2\gamma_m} e^{-(\gamma_m + \gamma_d)t_d} & \frac{\gamma_m + \gamma_d}{2\gamma_m} e^{-(\gamma_m - \gamma_d)t_d} \end{pmatrix},$$

$$T(z_{2,3} = t_d + t_m) = \begin{pmatrix} \frac{\gamma_p + \gamma_m}{2\gamma_p} e^{(\gamma_p - \gamma_m)(t_d + t_m)} & \frac{\gamma_p - \gamma_m}{2\gamma_p} e^{(\gamma_p + \gamma_m)(t_d + t_m)} \\ \frac{\gamma_p - \gamma_m}{2\gamma_p} e^{-(\gamma_p + \gamma_m)(t_d + t_m)} & \frac{\gamma_p + \gamma_m}{2\gamma_p} e^{-(\gamma_p - \gamma_m)(t_d + t_m)} \end{pmatrix},$$

$$T(z_{3,4} = t_d + t_m + t_p) = \begin{pmatrix} \frac{\gamma_0 + \gamma_p}{2\gamma_0} e^{(\gamma_0 - \gamma_p)(t_d + t_m + t_p)} & \frac{\gamma_0 - \gamma_p}{2\gamma_0} e^{(\gamma_0 + \gamma_p)(t_d + t_m + t_p)} \\ \frac{\gamma_0 - \gamma_p}{2\gamma_0} e^{-(\gamma_0 + \gamma_p)(t_d + t_m + t_p)} & \frac{\gamma_0 + \gamma_p}{2\gamma_0} e^{-(\gamma_0 - \gamma_p)(t_d + t_m + t_p)} \end{pmatrix},$$

где γ_0 – постоянная распространения электромагнитной волны в области до и после измеряемой структуры; γ_m , γ_p , γ_d – постоянные распространения электромагнитной волны в металлическом слое, в полупроводниковой подложке, в слое диэлектрика соответственно.

Особенности отражения электромагнитного излучения от многослойной структуры с нанометровым металлическим слоем, нанесенным на подложку. Рассчитанные с использованием соотношений (1) и (3) частотные зависимости коэффициентов отражения $R(\omega, t_m)$ электромагнитной волны от трехслойной структуры (см. рис.1) носят ярко выраженный немонотонный характер. Имеется область резонансного отражения, которая определяется параметрами слоя диэлектрика и толщиной металлического слоя.

Расчеты показывают, что характерной особенностью отражения при отсутствии металлического слоя или при малой (менее 50 нм) его толщине является возможность реализации так называемого полуволнового резонанса, при котором на длине структуры укладывается целое число полуволн (сплошные кривые 1–4 на рис.2). В этом случае слоистая структура эквивалентна разомкнутому отрезку линии передачи.

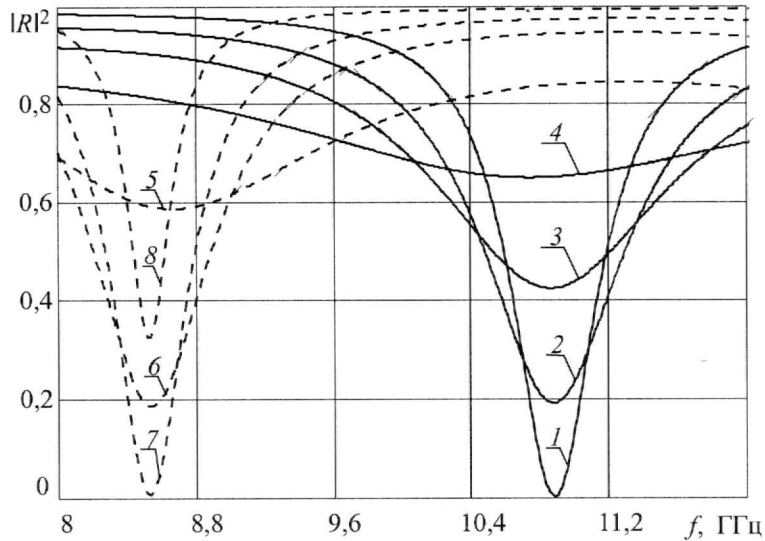


Рис.2. Расчетные зависимости квадратов модулей коэффициентов отражения $|R(\omega, t_M)|^2$ электромагнитной волны от трехслойной структуры от частоты при различных значениях толщины t_M и электропроводности σ_M металлического слоя: 1 – $t_M = 0$, $\sigma_M = 0$; 2 – $t_M = 12$ нм, $\sigma_M = 2,5 \cdot 10^5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; 3 – $t_M = 24$ нм, $\sigma_M = 3,2 \cdot 10^5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; 4 – $t_M = 33$ нм, $\sigma_M = 5,7 \cdot 10^5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; 5 – $t_M = 41$ нм, $\sigma_M = 1,2 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; 6 – $t_M = 70$ нм, $\sigma_M = 2,2 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; 7 – $t_M = 150$ нм, $\sigma_M = 2,2 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; 8 – $t_M = 650$ нм, $\sigma_M = 2,2 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$

При толщинах металлического слоя более 100 нм реализуются условия для возникновения четвертьволнового резонанса, при котором на длине структуры укладывается нечетное число величины $\lambda_{\text{рез}}/4$ (штриховые кривые 5, 6, 7 и 8 на рис.2). В этом случае слоистая структура с нанесенным металлическим слоем эквивалентна короткозамкнутому отрезку линии передачи. Здесь $\lambda_{\text{рез}}$ – длина волны зондирующего излучения в структуре на частоте резонанса.

Рассчитанные с использованием соотношений (1) и (3) зависимости квадратов модулей коэффициентов отражения $|R(\omega, t_M)|^2$ электромагнитной волны от толщины металлического слоя трехслойной структуры (см. рис.1) представлены на рис.3, а, б.

Выбором частоты зондирующего излучения из области полуволнового (рис.3, а) или четвертьволнового (рис.3, б) резонанса изменяется диапазон толщин металлического слоя, в котором наблюдается резкое изменение коэффициента отражения электромагнитного излучения от трехслойной структуры. В области полуволнового резонанса коэффициент отражения приближается к насыщению при толщине металлического (хром) слоя более 50 нм, в то время как в области четвертьволнового резонанса коэффициент отражения приближается к насыщению лишь при толщине металлического (хром) слоя более 3000 нм. Это позволяет использовать частотные зависимости коэффициента отражения из различных областей резонансного отражения для измерения металлического слоя толщиной от единиц до тысяч нанометров.

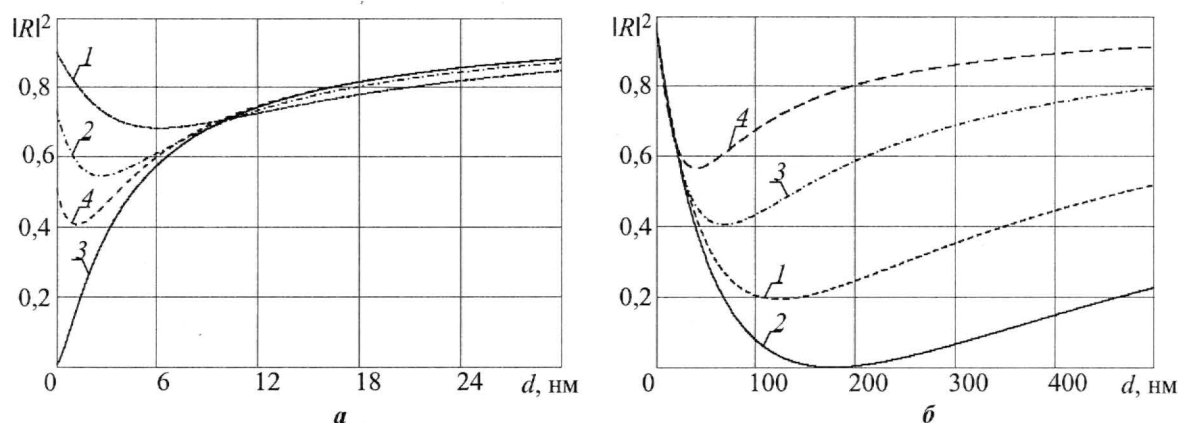


Рис.3. Расчетные зависимости квадратов модулей коэффициентов отражения $|R(\omega, t_m)|^2$ электромагнитной волны от толщины металлического слоя трехслойной структуры на различных частотах f , ГГц: 1 – 10; 2 – 10,4; 3 – 10,9; 4 – 11,2 (а); 1 – 8,4; 2 – 8,53; 3 – 8,8; 4 – 9,0 (б)

Интерференционные измерения толщины нанометрового металлического слоя, нанесенного на полупроводниковую подложку. Толщина ограниченной нанометровой металлической пленки на полупроводниковой подложке может быть определена интерференционным методом [8]. Величину фазового сдвига δ , возникающего между отраженными от полупроводниковой подложки и металлической пленки электромагнитными волнами оптического диапазона, можно определить из решения уравнения [8]

$$t_m = (\delta - \varphi_0 + \varphi(t_m)) \frac{\lambda}{2\pi}. \quad (4)$$

Здесь учитываются изменение фазы φ волны при отражении от структуры металлическая пленка–полупроводниковая подложка и изменение фазы φ_0 волны при отражении от полупроводниковой подложки, вследствие конечной величины поглощения оптического излучения металлической пленкой и подложкой.

Для повышения точности оптических измерений может быть использована разработанная система анализа видеоизображения интерференционных полос [8, 12]. Погрешность измерения толщины металлической пленки на полупроводниковой пластине с использованием интерференционного метода, системы цифрового ввода и компьютерного анализа видеоизображения определяется погрешностью в определении положения минимумов интенсивности на интерференционной картине. Дополнительная погрешность в определении толщины может быть обусловлена зависимостью показателя преломления и показателя поглощения металлической пленки от ее толщины в диапазоне 0–20 нм. При этом абсолютная погрешность измерений толщины металлической пленки в диапазоне 10–200 нм составляет не более ± 2 нм.

Определение электропроводности нанометрового металлического слоя по спектру отражения электромагнитной волны. Использование частотной зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения $R(\omega)$ от измеряемой структуры при известных параметрах подложки (электропроводность подложки σ_{Π} может быть определена из измерений коэффициента прохождения электромагнитной волны через полупроводниковую пластину до нанесения металлического слоя), тол-

щине t_m металлической пленки, определяемой, например, из (4), позволяет из решения уравнения (1) с учетом выражения (3) найти электропроводность σ_m металлического слоя.

Для определения электропроводности σ_m металлической пленки по спектру отражения электромагнитного излучения, обладающему резко выраженной частотной зависимостью, может быть использован метод наименьших квадратов. При реализации метода находится такое значение параметра σ_m , при котором сумма $S(\sigma_m)$ квадратов разностей экспериментальных $|R_{\text{эсп}}|^2$ и расчетных $|R(\omega, \sigma_m)|^2$ значений квадратов модулей коэффициента отражения становится минимальной:

$$S(t_m) = \sum \left(|R_{\text{эсп}}|^2 - |R(\omega, \sigma_m)|^2 \right)^2.$$

Искомое значение электропроводности металлической пленки толщиной t_m определяется численным методом с помощью ЭВМ в результате решения уравнения

$$\frac{\partial S(\sigma_m)}{\partial \sigma_m} = \frac{\partial \left(\sum \left(|R_{\text{эсп}}|^2 - |R(\omega, \sigma_m)|^2 \right)^2 \right)}{\partial \sigma_m} = 0. \quad (5)$$

Не применяя дополнительно интерференционный метод измерений, использование полученного значения электропроводности металлической пленки σ_m для отработанного технологического процесса ее нанесения позволяет определять толщину металлической пленки на подложке из измерений частотной зависимости коэффициента отражения R электромагнитного излучения СВЧ-диапазона от исследуемой структуры. Для использования последнего необходимо создание резкой границы металлической пленки, нанесенной на подложку.

Результаты экспериментальных исследований. В ходе экспериментальных исследований в диапазоне частот 8–12 ГГц измерен спектр отражения электромагнитной волны, взаимодействующей с изображенной на рис.1 структурой. Измеряемая структура помещалась в прямоугольном волноводе и полностью заполняла его по поперечному сечению. В этом случае постоянные распространения $\gamma_0, \gamma_m, \gamma_n, \gamma_d$ электромагнитной волны определяются выражениями [2, 8]:

$$\gamma_0 = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \epsilon_0 \mu_0}, \quad \gamma_{m,n} = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \epsilon_{m,n}^* \epsilon_0 \mu_{m,n} \mu_0}, \quad \gamma_d = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \epsilon_d \epsilon_0 \mu_0},$$

где $\epsilon_{m,n}^* = \epsilon_{m,n} - j \frac{\sigma_{m,n}}{\epsilon_0 \omega}$ – комплексная диэлектрическая проницаемость металлического слоя и подложки; a – размер широкой стенки волновода; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота электромагнитной волны; ϵ_0 и μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума; $\epsilon_{m,n}$ и $\mu_{m,n}$ – относительные диэлектрические и магнитные проницаемости решетки металлического слоя и подложки; $\sigma_{m,n}$ – электропроводность металлического слоя и подложки; ϵ_d – относительная диэлектрическая проницаемость слоя.

Экспериментально измерялись параметры титановых, никромовых и ванадиевых пленок, нанесенных на кремниевые подложки толщиной 500 мкм, и пленок хрома на керамических и стеклянных подложках. Коэффициент отражения измерялся с помощью

панорамного измерителя КСВН и ослабления Р2-61. В качестве диэлектрической вставки, помещаемой перед измеряемой пластиной, использовалась керамическая пластина с $\epsilon_d = 100$ и толщиной 3 мм.

На рис.4 представлены измеренные по описанной выше методике зависимости (дискретные кривые) квадратов модулей коэффициента отражения $|R_{\text{эсп}}|^2$ электромагнитной волны от исследуемой структуры (пленки хрома различной толщины на керамической Al_2O_3 подложке) от частоты зондирующего сигнала.

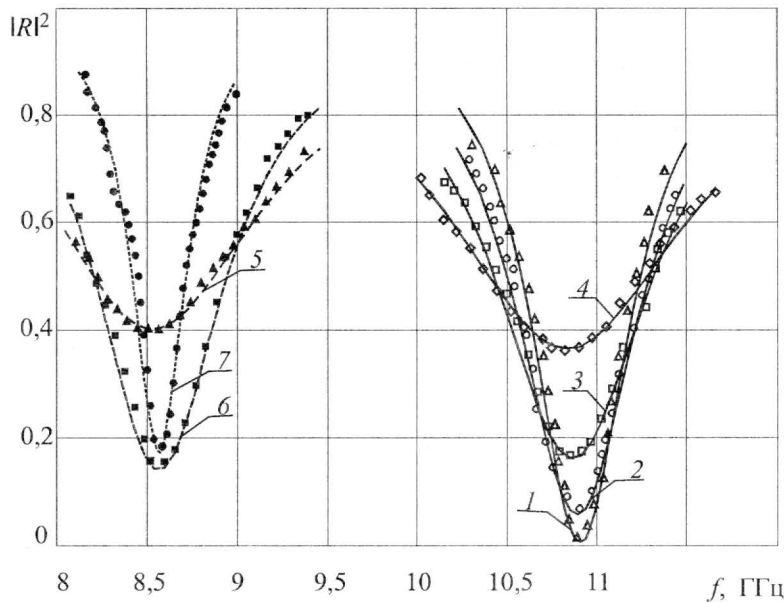


Рис.4. Экспериментальные (дискретные кривые) и расчетные (непрерывные кривые) зависимости квадратов модулей коэффициентов отражения $|R(\omega, t_M, \sigma_M)|^2$ электромагнитной волны от трехслойной структуры при различных толщинах t_M , нм и электропроводности σ_M , $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ металлического (хром) слоя: 1 – $t_M = 0$ нм, $\sigma_M = 0 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; 2 – $t_M = 11,9$ нм, $\sigma_M = 1,1 \cdot 10^5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; 3 – $t_M = 18,17$ нм, $\sigma_M = 1,458 \cdot 10^5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; 4 – $t_M = 20,87$ нм, $\sigma_M = 3,033 \cdot 10^5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; 5 – $t_M = 76,22$ нм, $\sigma_M = 1,134 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; 6 – $t_M = 144,68$ нм, $\sigma_M = 1,223 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; 7 – $t_M = 400$ нм, $\sigma_M = 2,18 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Кривые (1–6) – подложка поликор (керамика Al_2O_3), кривая 7 – кремниевая подложка

Измеренная частотная зависимость квадрата модуля коэффициента отражения $|R_{\text{эсп}}(\omega)|^2$ электромагнитного излучения СВЧ-диапазона использовалась для определения электропроводности σ_M металлической пленки (хром) на подложке (поликор) из решения уравнения (5). При этом значение толщины t_M металлической пленки определялось из измерения сдвига интерференционных полос на границе металлическая пленка–подложка и решения уравнения (6).

На рис.4 представлены также зависимости $|R(\omega)|^2$ (непрерывные кривые), рассчитанные с использованием соотношения (1) при $t_M = t_M$ и $\sigma_M = \sigma_M$, определяемые из (4) и (5).

При толщинах металлической пленки более 1,0 мкм коэффициент отражения от трехслойной структуры (см. рис.1) превышает 70%, что вызывает определенные трудности для его точного измерения. Однако, как показывают расчеты, при изменении ориентации подложки с нанесенным металлическим слоем относительно направления падения электромагнитной волны (со стороны подложки) коэффициент отражения от кремниевой подложки с алюминиевой пленкой толщиной 1,0 мкм составляет ~5%. Это позволяет проводить измерения с достаточной степенью точности.

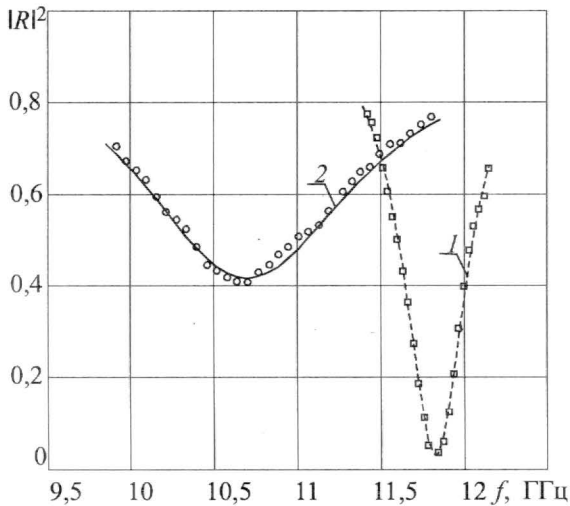


Рис.5. Экспериментальные (дискретные кривые) и расчетные (непрерывные кривые) зависимости $|R(\omega, t_M, \sigma_M)|^2$ от трехслойной структуры электромагнитной волны, падающей со стороны подложки — кремниевой пластины с нанесенным слоем алюминия (кривая 1) и без него (кривая 2). $t_M = 1,0$ мкм
 $\sigma_M = 3,751 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$

На рис.5 представлены измеренные частотные зависимости (дискретные кривые) квадратов модулей коэффициента отражения $|R_{\text{эксп}}|^2$ от исследуемой структуры электромагнитной волны, падающей со стороны подложки — кремниевой пластины с нанесенным слоем алюминия и без него.

С использованием описанной выше методики измерения электропроводности металлического слоя была определена электропроводность алюминиевого слоя толщиной 1,0 мкм, нанесенного на полупроводниковую пластину.

Зависимости $|R(\omega)|^2$ для трехслойной структуры, когда волна падает со стороны подложки — кремниевой пластины с нанесенным слоем алюминия (кривая 1) и без него (кривая 2), рассчитанные (непрерывные кривые) с использованием соотношения (1), представлены на рис.5. Значения толщины t_M и электропроводности σ_M , определялись из решения уравнений (4) и (5).

Из результатов проведенных измерений можно сделать вывод, что измеренные значения электропроводности металлических пленок (хром), нанесенных на керамическую подложку и применяемых в качестве адгезионного слоя при изготовлении микрополосковых СВЧ-устройств, и алюминиевых пленок на полупроводниковых подложках в несколько раз меньше электропроводности объемных материалов. При этом существенное уменьшение электропроводности металлических пленок наблюдается при толщинах меньше 20 нм. Предложенная и экспериментально реализованная методика измерения толщины и электропроводности нанометровых металлических пленок в слоистых структурах с использованием частотной зависимости коэффициента отражения электромагнитной волны от исследуемой структуры дает возможность решения практически важной задачи: определения толщины и электропроводности металлической пленки (хром, алюминий) в диапазоне от 10 нм до 2000 нм, нанесенной на полупроводниковые, керамические и стеклянные подложки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (коды проектов: 2.8.06 и 2.9.06), РФФИ (грант 05-08-17924а) ГК № 02.435.11.7012, ГК № 02.444.11.7318.

Литература

1. Гершензон Е.М., Литвак-Горская Л.Б., Плохова Л.А., Зарубина Т.С. Методы определения параметров полупроводниковых пленок на СВЧ. – В кн.: Полупроводниковые приборы и их применение / Под. ред. Е.А.Федотова. – М.: 1970. – Вып. – 23. С. 3–48.
2. Усанов Д.А. СВЧ-методы измерения параметров полупроводников. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1985. – 55 с.
3. Арапов Ю.Г., Давыдов А.Б. Волноводные методы измерения электрофизических параметров полупроводников на СВЧ // Дефектоскопия. – 1978. – № 11. – С. 63–87.
4. Афсар М.Н., Берч Дж.Р., Кларк Р.Н. Измерение характеристик материалов // ТИИЭР. – 1986. – Т. 74, № 1. – С. 206–220.
5. Grosse P. Freie elektronen in festkörpern. Berlin: Springer-Verlag, 1979.
6. Abramov A.V., Usanov D.A., Skripal A.V., Bogolyubov A.S. Microwave measurements of thickness and conductivity of nanometer metal-semiconductor structures // Proc. of 35rd European Microwave Conference (Paris, France. 3–7th October 2005). – 2005. – Vol. 2. – P. 509–512.
7. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С. Измерения толщины нанометровых слоев металла и электропроводности полупроводника в структурах металл–полупроводник по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения // ЖТФ. – 2006. – Т. 76, вып. 5. – С. 112–117.
8. Чаплыгин Ю.А., Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В., Семенов А.А., Абрамов А.В., Голишиников А.А. Радиоволновые и оптические измерения толщины и электропроводности металлических пленок на полупроводниковых и диэлектрических подложках // Изв. вузов. Электроника. – 2005. – № 1. – С. 68–77.
9. Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Особенности интерференции на границе тонкая металлическая пленка–диэлектрическое основание // Журнал технической физики. – 1994. – Т. 64, № 5. – С. 72–77.
10. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
11. Метфессель С. Тонкие пленки, их изготовление и измерение. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 272 с.
12. Патент на изобретение РФ №2233430. Способ видеоизмерения толщины пленки / Усанов Д.А., Скрипаль Ан.В., Скрипаль Ал.В., Абрамов А.В., Сергеев А.А., Абрамов А.Н., Корзюкова Т.В. Опубл. 27.07.2004. Бюл. № 21.

Статья поступила
18 апреля 2006 г.

Чаплыгин Юрий Александрович – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, ректор МИЭТ, заведующий кафедрой интегральной электроники и микросистем МИЭТ. *Область научных интересов:* твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, физика и технология сенсоров и микросистем.

Усанов Дмитрий Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой физики твердого тела, проректор по НИР СГУ. *Область научных интересов:* твердотельная, микро- и нанoeлектроника, радиофизика.

Скрипаль Александр Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела СГУ. *Область научных интересов:* твердотельная микро- и нанoeлектроника, радиофизика.

Абрамов Антон Валерьевич – кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры физики твердого тела СГУ. *Область научных интересов:* физика полупроводников, твердотельная электроника.

Боголюбов Антон Сергеевич – аспирант кафедры физики твердого тела СГУ. *Область научных интересов:* физика полупроводников, твердотельная электроника.

СХЕМОТЕХНИКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ

УДК 519.176+621.3.049.77

Обзор алгоритмов поиска кратчайших путей в задачах сжатия топологии ИС

К.К.Малинаускас

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Представлен обзор известных решений теоретико-графовых задач, связанных с проблемой сжатия топологии ИС на графе ограничений. Рассмотрены алгоритмы поиска кратчайших путей и циклов отрицательной длины во взвешенном направленном графе. Приведены наиболее значимые работы, опубликованные за последние полстолетия, в которых центральным является вопрос алгоритмической сложности. Выяснены свойства графа ограничений, позволяющие повысить эффективность методов. Даны рекомендации по использованию тех или иных алгоритмов.

На данный момент существует большое многообразие методов решения задач поиска кратчайших путей в графе с одним источником. Целью работы является обзор теоретико-графовых задач, связанных с проблемой сжатия топологии интегральных схем (ИС) на графе ограничений, и методов их решения. В работе приведены наиболее известные, интересные с точки зрения теории и наиболее общие решения, послужившие основой для множества модификаций и эвристик. Упомянуты и ставшие популярными в последнее время динамические методы. Псевдокоды, приведенные в работе, могут отличаться от оригинальных символических кодов, так как алгоритмы описаны в едином стиле, основываясь на базовой процедуре релаксации ребер.

Одномерное сжатие топологии ИС. Система разностных ограничений и задача линейного программирования. Обычная топология ИС представляет собой набор прямоугольных фигур на плоскости со сторонами, параллельными координатным осям.

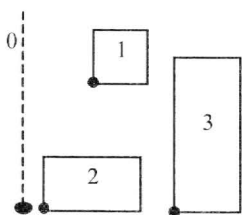


Рис. 1. Пример топологии

Фигуры соответствуют различным объектам, располагаемым на кристалле: транзисторам, трассировочным соединениям и др. Технологические правила налагают определенные ограничения на размер, форму и взаимное расположение фигур. Большинство одномерных правил описываются в виде так называемых разностных ограничений на координаты сторон фигур. На рис. 1 изображен простой пример с тремя прямоугольными фигурами фиксированного размера в одном слое. Заданы минимальные возможные расстояния между фигурами, также они должны располагаться справа от условной левой границы топологии с нулевой координатой.

После размещения элементов топологии и трассировки соединений топология может содержать свободные участки. С целью оптимизации использования площади кри-

сталла и уменьшения размеров топологии производят ее сжатие. Различают одномерное, полуторамерное и двумерное сжатие топологии в зависимости от количества степеней свободы движения элементов в процессе сжатия. В двумерном сжатии элементы могут изменять обе координаты, в одномерном – только одну из координат. Полуторамерное сжатие предполагает движение элементов в одном главном направлении с редкими перемещениями в перпендикулярном.

Одномерное сжатие топологии состоит в минимизации требуемой фигурами площади кристалла вдоль одной из осей координат. В общем случае фигуры располагаются в различных слоях, заданы ограничения на расстояния между ними, длины областей перекрытия и т.д. Задача сжатия подробно описана в [1, 2]. Данная оптимизационная задача является задачей *линейного программирования с разностными ограничениями* на переменные – координаты:

$$x_3 - x_1 \geq 7; x_3 - x_2 \geq 12; x_1 - x_0 \geq 0; x_2 - x_0 \geq 0; x_3 - x_0 \geq 0; \max x_i \rightarrow \min.$$

Классический симплекс-метод решает эту задачу за время $O(2^{\min(m, n/2)})$, где n – число переменных; m – число ограничений. Метод эллипсоидов предполагает использование ограниченных целочисленных координат, представляемых двоичным словом длины L . Его сложность – $O(n^3(n + m)L)$ [3]. Алгоритмы полиномиальной сложности для задачи общего вида с действительными координатами неизвестны.

Система разностных ограничений и граф ограничений. Задача с разностными ограничениями является частным и более простым случаем задач линейного программирования. Построим направленный взвешенный граф, вершины которого соответствуют координатам, а ребра – ограничениям между ними (рис.2). Условная левая граница топологии представляется вершиной-источником в графе: у нее отсутствуют входящие ребра. Каждому разностному ограничению $x_j - x_i \geq a$ соответствует ребро $x_i \rightarrow x_j$ с весом a , ограничению $x_j - x_i \leq b$ – ребро $x_i \rightarrow x_j$ с весом $-b$. Легко доказать, что задача оптимизации сводится к задаче поиска путей наибольшей длины от источника до всех вершин графа ограничений.

На рис.3 показано решение рассматриваемой задачи. Искомые координаты равны длинам найденных путей в графе от источника.

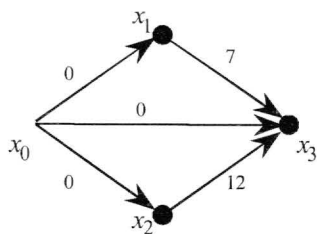


Рис.2. Граф ограничений и путь наибольшей длины до x_3

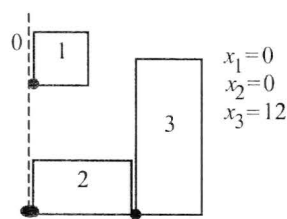


Рис.3. Решение задачи сжатия

Далее для удобства рассмотрим симметричную задачу поиска путей наименьшей длины в графе (получается путем изменения знаков весов ребер на противоположные). Последняя задача является классической в теории графов и хорошо изучены полиномиальные алгоритмы ее решения. Отметим, что решение задачи существует, если в графе отсутствуют циклы отрицательной длины (иначе можно всегда выделить сколь угодно малый путь). Если же ограничиться поиском только простых путей, то при наличии таких циклов (будем называть их отрицательными циклами) задача становится NP-сложной [4].

Наличие отрицательных циклов на графе (в исходной задаче – положительных) означает несовместность технологических ограничений для заданной топологии. Практически существует несколько способов борьбы с отрицательными циклами: игнорирование какого-либо правила; изменение топологии в перпендикулярном направлении (например, сдвиг или изменение формы фигуры на критическом пути). Все способы фактически сводятся к удалению ребра из графа или изменения его веса с целью разрыва цикла.

Таким образом, сжимать имеет смысл топологию при отсутствии отрицательных циклов. Для того чтобы избавиться от последних, их необходимо локализовать. Поэтому будем рассматривать две задачи: поиск путей наименьшей длины от источника до каждой из вершин графа и поиск циклов отрицательной длины.

Поиск кратчайших путей из одного источника. Дан взвешенный направленный граф $G = (V, E)$ с весовой функцией $w: E \rightarrow \mathbf{R}$ и без циклов отрицательной длины. Найти дерево кратчайших путей от заданного источника s до каждой из вершин графа, т.е. для каждой вершины $u \in V$ определить: длину кратчайшего пути из s – $\delta(s, u) = \delta(u)$ (∞ , если путь не существует); родительскую вершину в дереве кратчайших путей $\Pi(u)$ (или ее отсутствие – $null$). Тогда пути легко находятся трассировкой родительских вершин $\Pi(u)$.

Общая схема алгоритмов, основанных на релаксации. Практически все известные алгоритмы поиска кратчайших путей основаны на релаксации – постепенном уточнении верхней оценки длины кратчайшего пути от источника в данную вершину. Пусть метка $d(s, v) = d(v)$ есть верхняя оценка длины кратчайшего пути из источника s в вершину v , а $P(v)$ – родительская вершина для v в текущем приближении к дереву кратчайших путей. Общая схема релаксационных алгоритмов состоит из этапа инициализации (INITIALIZE) и этапа последовательных релаксаций (RELAX):

```

procedure INITIALIZE
  for each  $v \in V$  do
     $d(v) := +\infty$ ;  $P(v) := null$ 
   $d(s) = 0$ 
end

procedure RELAX(ребро  $e = (u, v)$ )
  if  $d(v) > d(u) + w(u, v)$  then
     $d(v) := d(u) + w(u, v)$ 
     $P(v) := u$ 
    return TRUE
  else
    return FALSE
end
  
```

При успешной релаксации, когда через данное ребро может проходить более короткий путь, оценка кратчайшего пути улучшается. Релаксация обладает следующими свойствами [5]: $d(v) \leq d(u) + w(u, v)$; $d(v) \geq \delta(s, v)$, причем как только $d(v)$ достигает нижней границы, оценка больше не изменяется.

Следовательно, процесс последовательных приближений при повторяющейся релаксации всех ребер должен сходиться к решению задачи. Но скорость сходимости существенно зависит от порядка релаксации ребер, структуры графа и значений весов.

Поиск кратчайших путей в ациклическом графе. В качестве простейшего примера обычно рассматривается класс направленных ациклических графов (DAG – directed acyclic graph). Топологический порядок в таком графе – это частичный порядок

на множестве вершин, при котором $u < v$, когда существует направленный путь из u в v . Кратчайшие пути в ациклическом графе могут быть вычислены алгоритмом, предложенным Лоулером и использующим топологическую сортировку, за время $O(n + m)$, где n – число вершин; m – число ребер графа [5]:

```

procedure SP-DAG
  INITIALIZE
  Вычислить топологический порядок вершин графа  $G$ 
  for each  $u \in V$  в топологическом порядке do
    for each  $(u, v) \in E$  do
      RELAX( $u, v$ )
end

```

Но неизвестен метод, решающий задачу общего вида за линейное время.

Алгоритм Дейкстры – метод «установки меток» в графе с неотрицательными весами. Рассмотрим более общий класс графов, в котором могут присутствовать циклы, но ребра имеют неотрицательные веса. Классическим алгоритмом поиска кратчайших путей в таких графах является алгоритм Дейкстры [6]. В современной интерпретации в нем используется очередь по приоритету. Элементами очереди Q являются вершины графа v , упорядоченные по приоритету – величине текущей оценки кратчайшего пути $d(v)$. Алгоритм является «жадным»: из очереди каждый раз изымается первый элемент – с наименьшим значением приоритета (EXTRACT-MIN):

```

procedure DIJKSTRA
  INITIALIZE
   $Q \leftarrow V$ 
  while  $Q \neq \emptyset$  do
     $u := \text{EXTRACT-MIN}(Q)$ 
    for each  $(u, v) \in E$  do
      RELAX( $u, v$ )
  end
end

```

Алгоритм обладает тем свойством, что каждое ребро релаксируется единожды. При этом для любой вершины, покинувшей очередь, кратчайший путь определен окончательно, а все такие вершины образуют поддереву искомого дерева кратчайших путей. Поэтому алгоритм Дейкстры можно отнести к методам «установки меток» (label setting) по классификации в [7, 8] в отличие от методов «коррекции меток» (label correcting), в которых приближенное дерево кратчайших путей может меняться на итерациях. Сложность алгоритма существенно зависит от способа реализации очереди по приоритету. Во второй половине XX века изобретено множество структур данных, оптимизирующих сложность [5]: $O(n^2)$, если Q – линейный массив; $O((m + n) \log n)$, если Q – бинарная куча [5]; $O(n \log n + m)$, если Q – фибоначчиева куча [5]; $O(m + n \log^{1/2} W)$, если Q – цифровая куча (radix heap, [9]), а веса ребер – целые числа в интервале $(0, \dots, W)$.

Поиск кратчайших путей в планарном графе. Еще более общий класс графов – планарные графы. Поскольку граф ограничений может и не быть планарным, алгоритмы, предложенные Хенцингером, Кляйном и Рао [10], представляют только теоретический интерес. Авторы получили следующие границы стоимости поиска кратчайших путей, используя свойство планарности: $O(n)$ (!) – для случая с неотрицательными весами ребер; $O(n^{4/3} \log n W)$ – для случая с целыми весами ребер, превышающими $-W$.

Алгоритм Беллмана–Форда–Мура – метод «коррекции меток» в графе с произвольными весами. Рассмотрим задачу поиска кратчайших путей в графе с произвольными весами ребер. Алгоритм Беллмана–Форда–Мура (БФМ) основан на методах, независимо предложенных Беллманом [11], Фордом [12] и Муром [13].

```

procedure BFM
  INITIALIZE
  for  $i = 1$  to  $|V| - 1$  do
    for each  $(u, v) \in E$  do
      RELAX( $u, v$ )
  for each  $(u, v) \in E$  do
    if  $d(v) > d(u) + w(u, v)$  then
      return FALSE
  return TRUE
end

```

В основе алгоритма лежит динамическое программирование и релаксация всех ребер графа за $n - 1$ проходов. Поскольку ребра релаксируются по несколько раз, алгоритм относится к методам «коррекции меток» по классификации, приведенной в [7, 8]. Второй цикл проверяет все ребра на выполнение свойств релаксации. В случае, если для какого-то ребра свойство не выполнено, алгоритм сообщает о присутствии отрицательного цикла в графе. Таким образом, его сложность – $O(nm)$. Существует множество модификаций алгоритма БФМ, но неизвестен способ решения задачи общего вида за время, асимптотически меньшее, чем $O(nm)$.

Модификация Йена алгоритма БФМ. Йен (Yen) [14] опубликовал модификацию алгоритма Беллмана–Форда, в которой вершины графа произвольным образом пронумерованы от 1 до n , а ребра разбиты на два множества: $E_f = \{(v_i, v_j) \in E \mid i < j\}$, $E_b = \{(v_i, v_j) \in E \mid i > j\}$.

```

procedure YEN
  INITIALIZE
  for  $i = 1$  to  $\lceil n/2 \rceil$  do
    for  $v = v_1$  to  $v_n$  do
      for each  $(v, u) \in E_f$  do
        RELAX( $v, u$ )
    for  $v = v_n$  to  $v_1$  do
      for each  $(u, v) \in E_b$  do
        RELAX( $u, v$ )
end

```

Алгоритм Йена сходится за $n/2$ итераций, его сложность – $O(nm/2)$.

Обобщение алгоритма БФМ – введение очереди. Обобщенным алгоритмом БФМ в настоящее время называют следующий метод [8, 15]:

```

procedure GENERAL-BFM
  INITIALIZE
   $Q := \{s\}$ 
  repeat
     $u := \text{POP}(Q)$ 
    for each  $(u, v) \in E$  do
      if RELAX( $u, v$ ) then
        PUSH( $Q, v$ )
  until  $Q = \emptyset$ 
end

```

Отличие его в том, что ребра релаксируются в определенном порядке, заданном специальной очередью из вершин. Вначале в очереди находится единственный элемент – источник. Заданы операции помещения вершины в очередь и извлечения из нее (PUSH и POP). Если вершина уже находится в очереди, операция PUSH может изменить позицию вершины в ней. Используя различные реализации этих операций, получаем модификации алгоритма Беллмана–Форда–Мура.

Использование очередей FIFO и LIFO. Естественным является использование стандартных очередей FIFO (простая очередь) и LIFO (стек) (рис.4). Сложность обобщенного алгоритма БФМ с использованием очереди – $O(nm)$, с использованием стека – $O(n^2)$ [15].



Рис.4. Простая очередь и стек

Алгоритмы Д’Эзопо–Пэйп и Паллотино. Пэйп (Pape) на основе идей Д’Эзопо (D’Esopo) предложил использование двусторонней очереди (рис.5). Вершина графа первый раз помещается в конец очереди, а каждый последующий – в начало. В [15] показано, что такая структура данных может быть интерпретирована как комбинация обычной очереди и стека (см. рис.5), сложность алгоритма – $O(n^2)$.

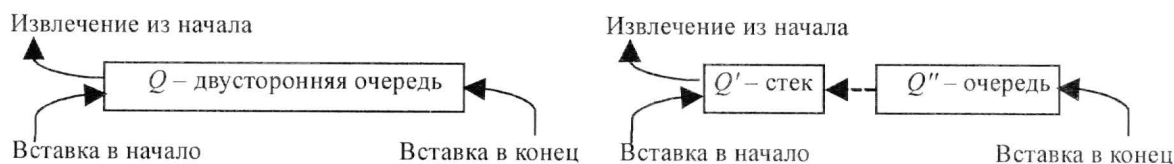


Рис.5. Двусторонняя очередь

Паллотино [15] развил данную идею и использовал комбинацию из двух очередей FIFO (рис.6). Каждая вершина помещается в очередь Q' в первый раз, а каждый следующий раз – в очередь Q'' . Сложность алгоритма уже не экспоненциальная: $O(mn^2)$.

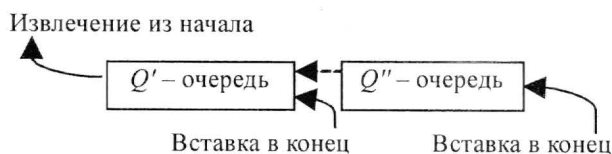


Рис.6. Комбинация двух очередей FIFO

Как утверждается в [15], обе модификации часто превосходят алгоритм Беллмана–Форда по быстродействию на практических задачах.

Обобщенный алгоритм Дейкстры. Еще одна модификация алгоритма БФМ использует приоритетную очередь, упорядоченную по текущей оценке $d(v)$, и, по сути, является обобщением алгоритма Дейкстры для графа общего вида. В отличие от графа

с неотрицательными весами в общем случае вершины могут попадать в очередь более одного раза. Сложность алгоритма экспоненциальная [4] – $O(n2^n)$.

Алгоритм Джонсона с разбиением множества ребер. Джонсон (Johnson) [4] представил еще один класс алгоритмов, использующих очереди вершин. Это алгоритмы с разбиением множества ребер (arc set partition). Зададим произвольное разбиение множества ребер $E = E_1 \cup \dots \cup E_k$. Изменим БФМ так, чтобы релаксация ребер происходила с учетом данного разбиения. Для этого используются k очередей вершин Q_1, \dots, Q_k и обобщенный алгоритм БФМ выполняется на подграфах, индуцированных подмножествами ребер E_i :

procedure ARC-PARTITION-BFM

 INITIALIZE

$Q_1 := \emptyset$; PUSH(Q_1, s)

 ...

$Q_k := \emptyset$; PUSH(Q_k, s)

repeat

repeat A1 **until** $Q_1 = \emptyset$

 ...

repeat A $_k$ **until** $Q_k = \emptyset$

until $Q_1 = \dots = Q_k = \emptyset$

end

procedure A $_i$

$u := \text{POP}(Q_i)$

for each $(u, v) \in E_i$ **do**

if RELAX(u, v) **then**

 PUSH(Q_i, v)

end

Далее Джонсон рассматривает специальное разбиение $E = E_+ \cup E_-$, где $E_+ = \{e \in E \mid w(e) \geq 0\}$, а $E_- = \{e \in E \mid w(e) < 0\}$. В процедуре A1 для подграфа с неотрицательными ребрами предлагается использовать очередь по приоритету Q_1 такую же, как и в алгоритме Дейкстры. В процедуре A2 для подграфа с отрицательными ребрами – очередь вершин Q_2 , отсортированную в соответствии с топологическим порядком в подграфе (подграф ациклический, так как в графе отсутствуют циклы отрицательной длины). Таким образом гарантируется, что в каждом цикле, вызывающем A $_i$, вершины посещают очередь Q_i не более одного раза. Каждая очередь реализуется в виде бинарной кучи с высотой, ограниченной константой $k > 1$.

Асимптотическая оценка сложности алгоритма Джонсона: $O(\min(n^{2+1/k} + nm, n^2 \log n + nm \log n))$, где k – положительная константа. В общем случае это сложнее БФМ. Однако метод эффективен на разреженных графах и интересен как теоретический результат. Отметим, что в [4] предлагается также алгоритм поиска кратчайших путей между всеми парами вершин, имеющий такую же оценку сложности.

Алгоритмы с разбиением очереди и пороговые алгоритмы. Гловер, Клингман и Филлипс (Glover, Klingman, Phillips) [16] опубликовали алгоритм поиска кратчайшего пути на графе без отрицательных циклов, разбивающий очередь Q на две FIFO очереди: *NOW* и *NEXT*. Вершины изымаются из начала *NOW* и помещаются в конец *NEXT*, когда их метки изменяются. Когда *NOW* пуста, в нее перемещаются все вершины из *NEXT*. Обе очереди в совокупности, по сути, представляют обычную очередь FIFO в обобщенном БФМ (см. рис.4). Основное отличие данного алгоритма в том, что каждый раз, когда очередь *NOW* пуста, метки вершин хранят точные значения длин путей в те-

кущем приближении к дереву кратчайших путей. Точность достигается за счет того, что после каждой удачной релаксации и изменения метки вершины v производится обновление меток всех вершин подграфа T_v . Подграф T_v определяется как поддереву текущего приближенного дерева кратчайших путей, имеющее корень v . Алгоритм имеет сложность $O(n^2m)$.

```

procedure PARTITIONING-SHORTEST-PATHS
  INITIALIZE
   $NOW := \{s\}$ 
  repeat
     $NEXT := \emptyset$ 
    repeat
       $u := \text{POP}(NOW)$ 
      for each  $(u, v) \in E$  do
         $\delta := d(u) + w(u, v) - d(v)$ 
        if  $\text{RELAX}(u, v)$  и  $v \notin NOW \cup NEXT$  then
           $\text{PUSH}(NEXT, v)$ 
          for each  $v' \in T_v$  do
             $d(v') := d(v') + \delta$ 
            if  $v' \notin NOW \cup NEXT$  then
               $\text{PUSH}(NEXT, v')$ 
          end (for)
        end (if)
      end (for)
    until  $NOW = \emptyset$ 
     $NOW := NEXT$ 
  until  $NEXT = \emptyset$ 
end
  
```

Развивая идею разбиения очереди, авторы [16] описывают несколько модификаций метода, названных пороговыми (threshold) алгоритмами. Однако они предназначены лишь для графов с неотрицательными весами ребер. Отметим, что эти алгоритмы используют еще одно множество вершин NOW' , имеющее больший приоритет при извлечении вершины, чем $NEXT$. В него помещаются вершины с измененными метками $d(v) \leq t$, где t – порог, определяемый эвристически в пределах между минимальным и средним значением $d(v)$, $v \in NEXT$. Асимптотическая сложность самого быстрого порогового алгоритма, описанного в [16], для графа с неотрицательными весами – $O(nm)$.

Алгоритм Данцига–Блаттнера–Рао. Данциг, Блаттнер и Рао (Dantzig, Blattner, Rao) теоретически обосновали [17] индуктивный метод вычисления дерева кратчайших путей в графе без отрицательных циклов или обнаружения такого цикла (алгоритм ДБР). На k -ом шаге рассматривается множество S_k «интегрированных» вершин, включающее источник s . Причем в подграфе G_k , индуцированном этим множеством, отрицательные циклы заведомо отсутствуют и известно дерево кратчайших путей. Сначала S_k состоит из одного элемента s . Переход к следующему шагу осуществляется «интеграцией» очередной вершины u : $S_{k+1} := S_k \cup \{u\}$.

```

procedure DBR
  INITIALIZE
  for each  $u \in V \setminus \{s\}$  do
    if not  $\text{INTEGRATE}(u)$  then
      return FALSE
    return TRUE
  end
  
```


Интеграция считается успешной, если не обнаружено отрицательного цикла. Процедура интеграции вершины u состоит из двух этапов. Сначала релаксируются все ребра, входящие в u с начальными вершинами в S_k , что гарантирует точность оценки $d(u)$ для графа G_{k+1} . Второй этап – вычисление оценок $d(v)$, $v \in S_k$ с помощью алгоритма «установки меток», подобному алгоритму Дейкстры.

```

procedure INTEGRATE(вершина  $u$ )
  for each  $(v,u)$ ,  $v \in S$  do
    RELAX( $v,u$ )
  for each  $v \in S \cup \{u\}$  do
    decrease( $v$ ) := 0
   $Q := \{u\}$  // очередь по приоритету, упорядоченная по decrease( $v$ )
  repeat
     $v := \text{POP}(Q)$  // извлечь вершину с наименьшим decrease
    for each  $e = (v,t)$ ,  $t \in S \cup \{u\}$  do
      if RELAX( $e$ ) then
        decrease( $t$ ) :=  $d(t)$  – значение  $d(t)$  до релаксации
        if  $t \neq u$  then
          PUSH( $Q, t$ )
      else
        return FALSE
  until  $Q = \emptyset$ 
   $S := S \cup \{u\}$ 
  return TRUE
end

```

Здесь используется очередь по приоритету Q , упорядоченная по значению разницы оценок $d(v)$ после и до релаксации ($\text{decrease}(v) < 0$). Из Q извлекается элемент с наименьшим значением decrease . Доказано [17], что при таком упорядочивании каждая вершина $v \in S_{k+1}$ посещает очередь в процедуре INTEGRATE не более одного раза, после которого ее оценка $d(v)$ точна для графа G_{k+1} , т.е. обнаруживается сходство с алгоритмом Дейкстры. Релаксация с попыткой изменить уже найденную оценку интегрируемой вершины $d(u)$ говорит о наличии отрицательного цикла в графе G_{k+1} , который легко локализовать путем трассировки родительских вершин $P(v)$.

Алгоритм ДБР состоит из $n - 1$ этапов интеграции, имеющих каждый сложность алгоритма Дейкстры. Поэтому сложность ДБР зависит от способа реализации очереди по приоритету (см. таблицу). Отметим, что алгоритм работает быстрее в разреженном графе, а в ациклическом графе достигает линейной сложности, если вершины интегрировать в топологическом порядке.

Масштабирующие алгоритмы. Масштабирующие алгоритмы (*scaling*) используют числовые свойства параметров задачи и вычисляют точное решение путем последовательных приближений. Применяются следующие два предположения: *целочисленность*: веса ребер – целые числа; *подобие (similarity)*: веса ребер полиномиально ограничены, т.е. наибольший по модулю вес ребра $W = n^{O(1)}$, или $\log W = O(\log n)$.

Первое условие определяет область применимости методов. Второе условие естественным образом удовлетворяется на практике: веса ребер и число вершин графа, а следовательно, и размеры списков имеют величины одного порядка, так как представляются машинными словами одинаковой длины. Последнее условие позволяет получить полиномиальные оценки сложности и удобно для сравнения с другими алгоритмами. Тем не менее его можно ослабить. Например, для $N = 2^{O(n^{1/4})}$ масштабирующие алгоритмы все еще превосходят другие по быстродействию [18]. Общий метод масштабирования может быть сформулирован рекурсивно и итерационно.

Рекурсивное масштабирование заключается в постоянном уменьшении параметров вдвое (для весов ребер: $w_{k+1}(u,v) = \lfloor w_k(u,v)/2 \rfloor$) и рекурсивном решении полученной задачи, удваивании чисел решения ($\tilde{d}_k(v) = 2d_{k+1}(v)$) и преобразовании полученного приближенного решения ($\tilde{d}_k(v)$) исходной задачи (с параметрами $w_k(u,v)$) в точное ($d_k(v)$). Рекурсия продолжается, пока все параметры больше 2. Самая «маленькая» задача решается напрямую процедурой преобразования из нулевого приближения (все $d_s(v) = 0$). Масштабирование может осуществляться не только в 2 раза, но и в любое целое число раз.

Итерационное масштабирование состоит в последовательном преобразовании решения задачи для первых k битов двоичного представления параметров ($w = w_0, \dots, w_s$, где $s = \lfloor \log_2 W \rfloor + 1$) к решению для первых $k+1$ битов, начиная с нулевого приближения (все $d_0(v) = 0$), при $k = 0, \dots, s-1$.

Габоу [18, 19] предложил масштабирующие алгоритмы поиска кратчайших путей как в рекурсивной, так и в итерационной интерпретациях. Их сложность зависит от разрядной длины параметров задачи W (см. таблицу).

Топологические алгоритмы. Гольдберг (Goldberg) и Радзик (Radzik) представили алгоритм поиска кратчайших путей нового типа и назвали его алгоритмом топологического сканирования (topological-scan algorithm) [20]. Метод совмещает в себе общие идеи релаксационных методов и алгоритма поиска кратчайших путей в ациклическом графе.

В алгоритме Гольдберга–Радзика используются две очереди вершин: A и B . Первая упорядочена топологически. Порядок задается на подграфе $G_d = (V, E_d)$, где $E_d = \{(u,v) \in E \mid w_d(u,v) < 0\}$, а $w_d(u,v) = w(u,v) + d(u) - d(v)$ – редуцированная весовая функция ребер. Условие $w_d(u,v) < 0$ говорит о том, что ребро (u,v) можно успешно релаксировать и уточнить оценку $d(v)$. Поэтому имеет смысл вершину u извлекать из A раньше, чем вершину v , что и обеспечивает топологическая сортировка. Один проход алгоритма состоит из извлечения всех вершин из A в топологическом порядке и релаксации исходящих ребер с помещением вершин с измененными метками в B . После чего из B удаляются вершины, для которых все исходящие ребра имеют неотрицательный редуцированный вес. Очередь A затем заполняется вершинами графа, достижимыми из вершин B по ребрам графа G_d . Предполагается, что в G отсутствуют циклы отрицательной и нулевой длины, тогда упомянутый топологический порядок существует. В противном случае при обнаружении отрицательного цикла работа алгоритма прерывается, а при обнаружении нулевого цикла – последний стягивается в одну вершину.

procedure TOPOLOGICAL-SCAN

INITIALIZE

$A := \emptyset; B := \{s\}$

repeat

 Удалить из B все вершины v : $\forall (v,u) \in E \quad w_d(v,u) \geq 0$

$A := \{v \in V \mid v \text{ достижима из вершин множества } B \text{ в графе } G_d\}$

 Упорядочить A в соответствии с топологическим порядком в G_d

repeat

$u := \text{POP}(A)$

for each $(v,u) \in E$ **do**

if RELAX(u,v) **then**

 PUSH(B,v)

until $A = \emptyset$

until $B = \emptyset$

end

Алгоритм Гольдберга–Радрика имеет сложность $O(mn)$. Авторы [20] утверждают, что на практике он быстрее алгоритма Беллмана–Форда.

Использование потенциальной функции. Потенциальной функцией графа (potential function) [21] называют произвольную функцию $f: V \rightarrow \mathbf{R}$. Приведенные веса ребер относительно потенциальной функции $-w_f(u, v) = w(u, v) + f(u) - f(v)$. Оказывается, что задача поиска кратчайших путей инвариантна относительно приведенных весов ребер [22], т.е., дерево кратчайших путей остается неизменным при переходе к приведенным весам ребер, хотя длины путей могут меняться. Более того, если $\delta_j(v)$ – длины кратчайших путей в приведенной задаче, то $\delta(v) = \delta_j(v) + f(v) - f(s)$, где s – источник. Использование хорошо подобранной потенциальной функции может упростить исходную задачу. Например, для любого графа без отрицательных циклов существует потенциальная функция, приводящая его к графу с неотрицательными весами ребер. Такой прием используется в алгоритме Джонсона поиска кратчайших путей между всеми парами вершин [22]. Алгоритмы, последовательность действий которых не изменяется при переходе к приведенным весам, называются *потенциально-инвариантными* (potential-invariant), следовательно, их сложность также инвариантна. Но некоторые алгоритмы могут ускориться с использованием потенциальной функции [21].

Динамические алгоритмы. На практике все чаще приходится иметь дело с графами большого размера, часто меняющимися во времени. В этом случае вычисление кратчайших путей каждый раз заново может оказаться слишком долгим. Поэтому становятся востребованными динамические алгоритмы, позволяющие относительно быстро модифицировать дерево кратчайших путей при небольших изменениях графа. Любое изменение можно разложить на следующие операции: удаление/вставка висячей вершины; удаление/вставка ребра; изменение веса ребра. Обработка операций над вершинами тривиальна. Удаление и вставка ребра могут быть представлены как частные случаи изменения веса (от конечного до $+\infty$ и от $+\infty$ до конечного соответственно). Поэтому далее будем рассматривать лишь операцию изменения веса ребра, в частности его уменьшение и увеличение [23–26].

Общий принцип методов одинаков и состоит в локальном изменении дерева путей, которое распространяется, начиная с ребра с переназначенным весом. От того, как быстро затухает такое распространение, зависят временные затраты. Поэтому сложность динамических алгоритмов обычно определяют как функцию от «размера выхода» – числа вершин, у которых поменялась длина пути или родительская вершина в дереве кратчайших путей.

Динамический вариант обобщенного алгоритма БФМ. В работе [23] описан общий подход к созданию динамических алгоритмов на базе известных статических. По существу, предложен динамический вариант обобщенного алгоритма БФМ. Ниже приведен упрощенный псевдокод, переписанный в терминах релаксации ребер. Предполагается, что на заданном графе без циклов отрицательной длины уже построено текущее дерево путей любым статическим методом и необходимо изменить его в соответствии с новым весом какого-либо ребра. Динамический вариант БФМ отличается способом инициализации очереди вершин. Последовательность релаксаций остается такой же, как и в статическом варианте.

```

procedure DYNAMIC-GENERAL-BFM(граф  $G$ , ребро  $e = (u, v)$ , изменение веса  $\Delta$ )
    // Назначение нового веса ребра
     $w(e) := w(e) + \Delta$ 
    // Инициализация очереди вершин
    if  $\Delta > 0$  then

```

```

// Если ребро  $e$  принадлежит дереву кратчайших путей
if  $P(v) = u$  then
     $d(v) := d(v) + \Delta$ 
    for each  $(u', v) \in E$  do
        if RELAX( $u', v$ ) then
            PUSH( $Q, v$ )
    end
else if  $\Delta < 0$  then
    if RELAX( $u, v$ ) then
        PUSH( $Q, v$ )
    end
// Последовательность релаксаций
repeat
     $u := \text{POP}(Q)$ 
    for each  $(u, v) \in E$  do
        if RELAX( $u, v$ ) then
            PUSH( $Q, v$ )
    until  $Q = \emptyset$ 
end

```

В [23] приведены две оптимизации данного метода. Первая относится к процедуре релаксации ребра (u, v) , где предлагается уточнять оценку $d(v)$ не единственной вершины v , а множества вершин, находящихся в поддереве текущего дерева кратчайших путей, имеющем корень v . Вторая оптимизация относится к одновременной обработке изменений весов сразу нескольких ребер. Оценки сложности динамических аналогов конкретных статических алгоритмов [23] следующие: $O(D_{\max} n_d^2)$ – аналог алгоритма БФМ с очередью FIFO; $O(n_d^2 + D_{\max} n_d)$ – аналог алгоритма Дейкстры, Q – линейный массив; $O(D_{\max} n_d \log n_d)$ – аналог алгоритма Дейкстры, Q – бинарная куча; $O(n_d \log n_d + D_{\max} n_d)$ – аналог алгоритма Дейкстры, Q – фибоначчиева куча. Здесь D_{\max} – максимальная степень вершины в графе (число входящих и исходящих ребер); n_d – число вершин, изменивших длины путей $\delta(v)$. Аналоги алгоритма Дейкстры оценены для графов с неотрицательными весами. Очевидно, $D_{\max} \leq m$ и $n_d \leq n$. Видно, что сложность зависит от структуры графа и масштаба изменений. В худшем случае динамические аналоги менее эффективны, однако на практике часто достигается значительный выигрыш. Подобным способом можно построить динамические варианты и других статических алгоритмов.

В [24] описан похожий динамический аналог алгоритма Дейкстры для графа с неотрицательными весами. Для графов с произвольными весами ребер и без циклов отрицательной длины предлагается переназначить веса на неотрицательные, используя $\delta(v)$ в качестве потенциальной функции (корректность переназначения показана в [24]).

Алгоритм Фриджиони. Более сложные динамические алгоритмы можно найти в работах Фриджиони и др. [26]. Приведем оценки сложности алгоритма. Оценивая временные затраты, авторы используют характеристику графа более общую, чем максимальная степень вершины. Введем определения. *Учетная функция* (accounting function) графа G – функция $A(u, v)$, для каждого ребра (u, v) определяющая вершину-владельца u или v . Учетная функция является k -ограниченной (k -bounded), если k – максимальный размер множества ребер, которыми может владеть вершина графа. Справедливы следующие соотношения [25]:

$$k = O(\sqrt{m});$$

$k = O(1 + \sqrt{\gamma})$ для графов рода (genus) γ (γ – наименьшее число ручек, которые необходимо добавить к плоскости, чтобы вложить в нее граф);

$$k \leq 3 \text{ для планарных графов};$$

$k \leq a$ для графов с древесностью (arboricity) a (a – наименьшее число непересекающихся по ребрам лесов, на которые можно разложить граф);

$k \leq D_{\max}$ для графов с максимальной степенью вершины D_{\max} ;

$k \leq t$ для графов с древесной шириной (treewidth) t [26];

$k \leq p$ для графов со страничным числом (pagenumber) p (p – наименьшее число «страниц» в «книге», в которую можно вложить граф без пересечения ребер. «Книга» – это набор «страниц» – полуплоскостей с общей границей. Вершины графа должны располагаться на границе, ребра не должны пересекать границу, кроме как в вершинах).

В алгоритме Фриджиони используется k -ограниченная учетная функция, поэтому его сложность зависит как от размера измененной части дерева кратчайших путей, так и от параметра k : $O(\min\{m, kn_d\} \log n)$ – в случае уменьшения веса ребра; $O(\min\{m \log n, kn_d \log n + n\})$ – в случае увеличения веса ребра (если граф содержит циклы нулевой длины, то оценка несколько больше [25]).

В [26] показано, как найти подходящую учетную функцию за линейное время. Алгоритм Фриджиони также обнаруживает отрицательный цикл, если он появляется в графе после уменьшения веса ребра.

Сложность алгоритмов поиска кратчайших путей из одного источника. Теоретические оценки. Приведем сравнительную таблицу рассмотренных алгоритмов поиска кратчайших путей во взвешенном направленном графе и их оценок сложности в худшем случае. Здесь n – число вершин, m – число ребер графа, $W = \max |w(e)|$, Q – очередь по приоритету. Веса ребер и структура графа произвольные, если не указано иное.

Теоретические оценки сложности алгоритмов

Алгоритм	Сложность	Комментарии
1	2	3
Статические алгоритмы		
Лоулера	$O(n + m)$	Ациклический граф
Дейкстры (неотрицательные веса ребер)	$O(n^2)$	Q – линейный массив
	$O((m + n) \log n)$	Q – бинарная куча
	$O(n \log n + m)$	Q – фибоначиева куча
	$O(m + n \log^{1/2} W)$	Q – цифровая куча, веса целые
Хенцингера–Кляйна– Рао (планарный граф)	$O(n)$	Неотрицательные веса
	$O(n^{4/3} \log n W)$	Целые веса
БФМ	$O(nm)$	–
Йена	$O(nm/2)$	В 2 раза меньше итераций, чем в БФМ
Модификации БФМ (использование спе- циальной очереди вершин Q)	$O(nm)$	Q – очередь FIFO
	$O(n2^n)$	Q – очередь LIFO
	$O(n2^n)$	Д’Эзоп–Пэйп: LIFO + FIFO
	$O(mn^2)$	Паллотино: FIFO + FIFO
	$O(\min(n^{2+1/k} + nm, n^2 \log n + nm \log n))$	Алгоритм Джонсона с разбиением множества ребер, $k > 0$ – любая константа
Гловера–Клингмана– Филлипса	$O(n^2 m)$	Алгоритм Дейкстры для произвольных весов
	$O(nm)$	Разбиение очереди
		Пороговый алгоритм, неотрицательные веса

Окончание таблицы

1	2	3
Дантцига–Блаттнера–Рао (индуктивный метод)	$O(n^3)$	Q – линейный массив
	$O((nm + n^2) \log n)$	Q – бинарная куча
	$O(n^2 \log n + nm)$	Q – фибоначчиева куча
	$O(m + n)$	Ациклический граф
	$O(n^2 \log n)$	Разреженный граф
Габоу (метод масштабирования)	$O(n^{1/2} m \log n W)$	–
	$O(m \log_{2+m/n} W)$	Неотрицательные веса
Гольдберга–Радчика	$O(mn)$	Топологический алгоритм
Динамические алгоритмы, сложность операции изменения веса ребра		
Динамические аналоги алгоритма Дейкстры (неотрицательные веса)	$O(n_d^2 + D_{\max} n_d)$	Q – линейный массив
	$O(D_{\max} n_d \log n_d)$	Q – бинарная куча
	$O(n_d \log n_d + D_{\max} n_d)$	Q – фибоначчиева куча
Динамический БФМ	$O(D_{\max} n_d^2)$	Q – очередь FIFO
Алгоритм Фриджиони и др. (граф имеет k -ограниченную учетную функцию)	$O(\min\{m, k n_d\} \log n)$	Уменьшение веса ребра
	$O(\min\{m \log n, k n_d \log n + n\})$	Увеличение веса ребра

Как видно, $O(mn)$ – верхняя граница, определяющая сложность задачи поиска кратчайших путей общего вида. Для некоторых классов графов известны алгоритмы меньшей сложности. Сложность зависит от эффективности используемых структур данных. Алгоритм БФМ имеет сложность $O(mn)$. Его модификации, а также другие алгоритмы асимптотически не более эффективны или даже менее эффективны. Однако, по утверждению авторов и по результатам тестирования, на многих практических примерах графов эти алгоритмы могут превосходить БФМ по быстродействию. Очевидно, динамические алгоритмы дают значительный выигрыш при незначительных модификациях графа: если они не приводят к пересчету большей части дерева кратчайших путей. Сравнительный теоретический анализ сложности различных алгоритмов приведены в [5, 7, 15, 16, 21, 22].

Экспериментальные оценки. Результаты тестирования представлены в [8, 16, 21, 28]. Отметим, что фактическая сложность алгоритма зависит от свойств графа. Так, выделяют плотные и разреженные графы. *Плотность графа* можно определить как ε : $m = O(n^{1+\varepsilon})$, $0 \leq \varepsilon \leq 1$. Для сравнения скорости алгоритмов на практике используют специальные семейства тестовых задач. (Простая) решетка – граф с вершинами, соответствующими точкам плоскости, имеющим целочисленные координаты (x, y) , $1 \leq x \leq X$, $1 \leq y \leq Y$. Вершины связаны ребрами «вперед»: $(x, y) \rightarrow (x+1, y)$, $1 \leq x < X$, $1 \leq y \leq Y$; «вверх» и «вниз»: $(x, y) \rightarrow (x, y \pm 1)$, $1 \leq x \leq X$, $1 \leq y \leq Y$. Дополнительный источник s связан с вершинами первого слоя ребрами $s \rightarrow (1, y)$. Решетка является длинной, если $X > Y$; широкой, если $X < Y$; квадратной, если $X = Y$. Сложная решетка содержит также дополнительные случайные ребра вида $(x, y) \rightarrow (x + i_x, y)$ и $(x, y) \rightarrow (x, y + j_y)$. Для исследования производительности алгоритмов на плотных графах используют генераторы случайных графов.

Обобщая экспериментальные исследования, встречающиеся в литературе, прежде всего в [21], отметим следующее:

– классический алгоритм БФМ является лучшим по производительности на графах с большой плотностью, тогда как большинство других алгоритмов превосходят его на разреженных графах;

- на простых решетках предпочтительны алгоритмы Д’Эзопо-Пэип и Паллотино, которые намного превосходят БФМ;
- на сложных решетках предпочтительны топологические алгоритмы;
- классический БФМ решает задачу на широких решетках значительно быстрее, чем на длинных. Остальные алгоритмы менее чувствительны к форме решетки;
- топологические и пороговые алгоритмы потенциально неинвариантны и могут быть несколько ускорены путем выбора потенциальной функции случайным образом в хорошо заданном интервале;
- задача с неотрицательными весами является более легкой для большинства алгоритмов, а на простых решетках алгоритмы Д’Эзопо-Пэип и Паллотино даже обгоняют алгоритм Дейкстры. Пороговые и топологические – приближаются к нему по быстродействию;
- задача на ациклическом графе решается за линейное время алгоритмом Лоулера. К нему по быстродействию приближаются топологические алгоритмы. При неотрицательных весах ребер также эффективен алгоритм Дейкстры;
- сложность может зависеть от величины вариации весов ребер. Если диапазон разброса невелик, все алгоритмы сравнимы по быстродействию, при большом диапазоне временные затраты возрастают. И здесь предпочтительны топологические и пороговые алгоритмы, показывающие меньшую зависимость от вариации весов.

Поиск циклов отрицательной длины. Свойства задачи. Задача поиска кратчайших путей становится NP-полной при наличии циклов отрицательной длины. В задаче сжатия топологии интегральной схемы аналогичная проблема возникает из-за положительных циклов, которые говорят о наличии множества несовместных ограничений. На практике такой цикл ликвидируется удалением или изменением весов одного или нескольких ребер графа. В результате цикл или разрывается, или становится неотрицательным. Удаление (изменение веса) ребра означает игнорирование или ослабление технологического правила. Однако удаление может быть вполне корректным, если провести модификацию топологии в перпендикулярном направлении, например раздвинув фигуры и ликвидировав соответствующее ограничение. В любом случае отрицательные циклы необходимо сначала локализовать, затем выбрать подходящие (критические) ребра для изменения. Выбор осуществляется исходя из критичности соответствующего технологического правила (если оно игнорируется) и/или исходя из возможности перпендикулярных преобразований. Также, очевидно, имеет смысл изменять те ребра, через которые проходит наибольшее количество циклов отрицательной длины. Однако поиск всех отрицательных циклов – NP-полная задача [29].

Отметим, что если граф небольшого размера или в нем немного циклов, допустимо применение экспоненциальных алгоритмов поиска всех циклов. Можно воспользоваться, например, алгоритмом, описанным Рейнгольдом [30], для поиска всех элементарных циклов графа за время $O(c(n+m))$, где c – общее число элементарных циклов. А затем выбрать из них отрицательные. Однако c может быть велико (автор приводит пример, где $c > (n-1)!$). Алгоритм, предложенный в [31], оптимизирован для поиска циклов только отрицательной длины, но тоже имеет экспоненциальную сложность.

При решении проблемы сжатия топологии обычно ограничиваются следующей постановкой задачи: последовательно ликвидировать как можно больше отрицательных циклов путем поиска одного из циклов и удаления (изменения весов) критических ребер. Эта задача уже решается за полиномиальное время. Большинство алгоритмов поиска кратчайших путей, рассмотренных выше, сообщают о наличии отрицательного

цикла в графе. Последний может быть восстановлен по вычисленным указателям родительских вершин $P(u)$.

Модификация Шиле алгоритма ДБР. Шиле (Schiele) представил модификацию алгоритма ДБР, позволяющую разрешать отрицательные циклы [32]. Особенность метода в том, что при обнаружении отрицательного цикла (неудачном завершении процедуры INTEGRATE) алгоритм поиска кратчайших путей не прекращает работу. Вместо этого цикл ликвидируется путем изменения весов некоторых ребер, определяется множество вершин, у которых необходимо обновить оценки $d(v)$, и они интегрируются заново. В упрощенном виде алгоритм имеет вид:

```

procedure SHIELE
  INITIALIZE
   $S := \emptyset$  // множество интегрированных вершин
  for each  $u \in V$  в порядке возрастания координат элементов топологии do
    repeat until INTEGRATE_2( $u, S$ )
  end

  // Интеграция вершины с разрешением возможного отрицательного цикла
  procedure INTEGRATE_2(вершина  $u$ , множество интегрированных вершин  $S$ )
    if not INTEGRATE( $u$ ) then
      Восстановить цикл проходом родительских вершин, начиная с  $u$ 
      Разрешить цикл путем изменения весов ребер
       $I := \emptyset$ 
      COLLECT-INFLUENCED-NODES( $u, I$ )
      // Интегрировать вершины  $I$  заново
       $S := S \cup I$ 
      for each  $v \in I$  do
        INTEGRATE( $v, S$ )
      return FALSE
    else
       $S := S \cup \{u\}$ 
      return TRUE
    end
  end

  // Рекурсивный поиск вершин, которые необходимо интегрировать заново
  // после разрешения отрицательного цикла
  procedure COLLECT-INFLUENCED-NODES(вершина  $u$ , результат – множество вершин  $I$ )
    for each  $(u, v) \in E$  do
      if  $u = P(v)$  then
         $I := I \cup \{v\}$ 
        COLLECT-INFLUENCED-NODES( $v, I$ )
      end
    end

```

Теоретическая сложность алгоритма на разреженном графе (в графе ограничений $m = O(n)$) – $O(pn^2 \log n)$, где p – число обнаруженных циклов. Вершины интегрируются в порядке возрастания исходных координат элементов топологии, который близок к топологическому. Поэтому на практике сложность может приближаться к линейной.

Алгоритм Ишимы–Цукиямы–Шиноды. Ишима, Цукияма и Шинода (Ishima, Tsukiyama, Shinoda) описали еще один подход к одновременному поиску кратчайших путей и удалению отрицательных циклов [33]. В данном подходе используются следующие предположения.

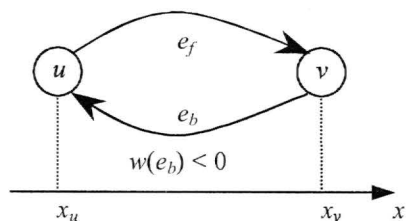


Рис. 7. Прямые и обратные ребра графа ограничений

1. Все ребра графа ограничений делятся на два множества (рис.7):

– прямые ребра $E = \{e_f = (u, v)\}$, соответствующие ограничениям вида $x_v - x_u \geq w(u, v)$; они могут иметь как положительные, так и отрицательные веса и направлены от вершины с меньшей координатой x_u к вершине с большей координатой x_v на исходной топологии;

– обратные ребра $E = \{e_b = (v, u)\}$ соответ-

ствуют ограничениям вида $x_u - x_v \leq w(v, u) < 0$; они всегда имеют отрицательные веса и противоположное направление.

2. Если в графе присутствует цикл, то он содержит обратное ребро.

Сначала за линейное время вычисляются кратчайшие пути из источника в ациклическом графе $G = (V, E_f)$ без обратных ребер. На каждой последующей итерации делается попытка добавить в граф одно обратное ребро. Если это не приводит к образованию отрицательного цикла, то ребро остается в графе и вычисляются новые кратчайшие пути. Иначе ребро игнорируется и определяется как критичное.

procedure ISHIMA-TSUKIYAMA-SHINODA-SHORTEST-PATHS

$G := (V, E_f)$

SP-DAG(G)

for $e = (u, v) \in E_b$ **do**

if $d(v) \leq d(u) + w(u, v)$ **then**

Добавить ребро e в граф G
(кратчайшие пути не меняются)

else

Вычислить $d(v, x)$ для всех $x \in V$ (см. комментарий ниже)

if $d(v, u) + w(u, v) < 0$ **then**

Игнорировать ребро e
(найден отрицательный цикл,
кратчайшие пути не меняются)

else

Добавить ребро e в граф G

for $x \in V$ **do**

$d(x) := \min\{d(x), d(u) + w(u, v) + d(v, x)\}$

end

end

end

Вначале используется алгоритм вычисления кратчайших путей в ациклическом графе SP-DAG. Самый сложный по времени шаг – вычисление $d(v, x)$ для всех $x \in V$ – выполняется специальным образом. Заметим, что на каждой итерации граф не содержит отрицательных циклов. Используя этот факт, можно переназначить веса, используя в качестве потенциальной функции найденные на данный момент значения $d(x)$. Доказано [33], что новые веса неотрицательны. Тогда длины путей $d(v, x)$ эффективно вычисляются алгоритмом Дейкстры.

В зависимости от реализации очереди вершин в используемом алгоритме Дейкстры алгоритм Ишимы–Цукиямы–Шиноды имеет следующую сложность (здесь b – число обратных ребер в графе ограничений): $O(bn^2)$, если Q – линейный массив; $O(b(m + n) \log n)$, если Q – бинарная куча; $O(b(n \log n + m))$, если Q – фибоначчиева куча; $O(b(m + n \log^{1/2} W))$, если Q – цифровая куча, а веса ребер – целые числа в интервале $(0, \dots, W)$.

Авторы [33] теоретически и экспериментально показали, что метод превосходит по быстродействию модификацию Шиле алгоритма ДБР. Однако этот подход опирается на предположения об обратных ребрах, которые не всегда выполнимы на практике.

Свойства графа ограничений и сложность алгоритмов. Граф ограничений обладает рядом свойств, которые влияют на фактическую сложность алгоритмов. *Во-первых*, в большинстве случаев граф ограничений является разреженным, т.е. $m = O(n)$ [1]. Следовательно, сложность классического алгоритма Беллмана–Форда становится $O(n^2)$, а большинство его модификаций работают быстрее. *Во-вторых*, веса ребер графа ограничений также обладают хорошими свойствами. Отражая технологические правила, они имеют небольшой разброс значений. Это тоже ускоряет работу большинства алгоритмов. Кроме того, проектирование интегральной схемы всегда происходит в определенной координатной сетке, задаваемой технологическим процессом. Поэтому технологические правила возможно описать целыми числами. А поскольку разброс значений невелик, то можно воспользоваться свойствами целочисленности и подобия и применить масштабирующие алгоритмы. Целочисленность задачи также позволяет организовать очередь вершин в виде цифровой кучи в алгоритмах ДБР и Ишимы–Цукиямы–Шиноды. *В-третьих*, граф ограничений по своей структуре намного сложнее простых решеток. Поэтому ожидается низкая эффективность алгоритмов Д’Эзопо–Пэйп и Паллотино. *В-четвертых*, иногда возможно заранее определить множество обратных ребер, которые порождают циклы в графе ограничений. Если их число b невелико, то рекомендуется применять алгоритм Ишимы–Цукиямы–Шиноды, достигающий сложности $O(bn \log n)$ на разреженном графе. При малом b сложность алгоритма приближается к сложности его начального этапа – релаксации ациклического графа, т.е. к $O(n)$.

Сложность задачи повышается при наличии большого числа b обратных ребер и числа p циклов положительной длины. Однако и здесь можно добиться близкой к линейной сложности, если циклы (фактически сильно связанные компоненты, которые определяются за линейное время) состоят из небольшого числа вершин. Стягивая каждый цикл в одну вершину, получим ациклический граф.

Если в графе ограничений отсутствуют положительные циклы (система ограничений совместна), а начальное размещение элементов топологии удовлетворяет технологическим правилам, т.е. $x_v - x_u \geq w(u, v)$, то введем потенциальную функцию $f(v) = x_v$. Тогда модифицированные веса ребер $w'(u, v) = w(u, v) + f(u) - f(v) \leq 0$ и симметричная задача поиска кратчайших путей решается алгоритмом Дейкстры за время $O(n \log n)$ [34].

Перечисленные предположения об обратных ребрах, циклах и правильности топологии далеко не всегда выполнимы. Наиболее эффективным способом сжатия топологии в этом случае с одновременным разрешением критических циклов является модификация Шиле алгоритма ДБР. Имея теоретическую оценку сложности $O(pn^2 \log n)$, на практике алгоритм значительно быстрее: эксперименты показывают сложность порядка $O(pn^{1.1})$ [32], т.е. близкую к линейной. Это объясняется, по-видимому, тем, что перед интеграцией вершины упорядочиваются по соответствующим координатам элементов топологии схемы. При этом на графе задается порядок, близкий к топологическому, а сложность алгоритма приближается к сложности решения задачи в ациклическом графе. Таким образом, для решения задачи сжатия на сложных графах ограничений рекомендуется использовать модификацию Шиле алгоритма ДБР.

Сложность динамического аналога БФМ с очередью FIFO – $O(D_{\max} n_d^2)$. Из разреженности графа ограничений следует, что средняя степень вершины есть константа, не зависящая от n . Но максимальная степень вершины может быть велика. При горизонтальном сжатии топологии большое количество ограничений возникает для вертикального протяженного объекта. Степень вершины графа, представляющей вертикальную

границу топологии, может достигать $D_{\max} = O(\sqrt{n})$. Поэтому сложность динамических алгоритмов, предложенных в [23], может даже превышать сложность статических аналогов, если возмущение, внесенное в топологию изменением одного ребра, велико и затрагивает вершины с высокой степенью.

Динамический алгоритм Фриджиони лишен такого недостатка и в самом худшем случае, когда $k = D_{\max} = O(\sqrt{n})$, его сложность не превышает $O(n \log n)$ на одну операцию изменения ребра. Вопрос о существовании k -ограниченной учетной функции для графа ограничений оставим открытым. Тем не менее уточним оценку роста параметра k . $k \leq a$, где a – древесность графа, т.е. наименьшее число непересекающихся по ребрам ациклических подграфов, покрывающих рассматриваемый граф. Будем утверждать, что $a \leq b+1$, где b – число обратных ребер. Под множеством обратных ребер подразумевается наименьшее множество ребер, замыкающих циклы в графе ограничений (их удаление сделает граф ациклическим). Обычно это ребра, направленные от вершины с большей координатой к вершине с меньшей координатой соответствующего элемента топологии. Действительно, выберем в качестве ациклических подграфов остовное дерево, получаемое после удаления обратных ребер, и подграфы, каждый из которых состоит из одного обратного ребра. Тогда $k = O(b)$ и оценки сложности алгоритма Фриджиони с учетом разреженности графа следующие: $O(\min\{n, bn_d\} \log n)$ – для операции уменьшения веса ребра и $O(\min\{n \log n, bn_d \log n + n\})$ – для операции увеличения веса.

Таким образом, для решения задачи динамического сжатия топологии (например, одновременно с внесением небольших изменений в схему во время ее редактирования разработчиком) рекомендуется использовать алгоритм Фриджиони. Однако неизвестны экспериментальные оценки эффективности динамических алгоритмов, примененных на графе ограничений.

Итак, перечислены основные способы решения задач поиска кратчайших путей из одного источника и циклов отрицательной длины, существующие сегодня.

Несмотря на то что теоретическая сложность алгоритмов для худшего случая хорошо изучена, отсутствует полный экспериментальный сравнительный анализ поведения различных методов на конкретных задачах. В частности, не до конца изучены свойства графа ограничений и их влияние на скорость алгоритмов. С развитием микроэлектроники и технологического процесса появляются новые правила размещения элементов топологии интегральных схем на кристалле и граф ограничений может менять свои свойства.

Литература

1. *Cho Y.E.* A subjective review of compaction // Proc. of 22nd IEEE Design Automation Conference. – 1985. – P. 396–404.
2. *Сотников М.А.* Разработка и исследование алгоритмов сжатия топологии стандартных ячеек субмикронных СБИС: Дисс. канд. техн. наук. – ЗАО «Моторола ЗАО». – М., 2004. – 119 с.
3. *Хачиян Л.Г.* Сложность задач линейного программирования. – М.: Знание, 1987. – 32 с.
4. *Johnson D.B.* Efficient algorithms for shortest paths in sparse networks // Journal of Association for Computing Machinery. – 1977. – Vol. 24, N 1, January. – P. 1–13.
5. *Кормен Т.* Алгоритмы. Построение и анализ. – М.: МЦНМО, 2004. – 960 с.
6. *Dijkstra E.W.* A note on two problems in connection with graphs // Nimerische Mathematic 1. – 1959. – P. 269–271.
7. *Gilsinn J., Witzgall Ch.* A performance comparison of labeling algorithms for calculating shortest path trees // NBS Technical Note 772, U.S. Dept. of Commerce. – 1973. – 22 с.
8. *Dial R., Glover F., Karney D., Klingman D.* A computational analysis of alternative algorithms and labeling techniques for finding shortest path trees // Networks. – 1979. – Vol. 9, issue 3. – P. 215–248.

9. *Ahuja R.K., Mehlhorn K., Orlin J.B., Tarjan R.E.* Faster algorithms for the shortest path problem // J. of the Association for Computing Machinery. – 1990. – Vol. 37, N 2, April. – P. 213–223.
10. *Henzinger M.R., Klein P., Rao S.* Faster shortest-path algorithms for planar graphs // J. of Computer and System Sciences 55. – 1977. – P. 3–23.
11. *Bellman R.* On a routing problem // Quarterly of applied mathematics. – 1958. – Vol. 16. – P. 87–90.
12. *Ford L.R.Jr.* Network flow theory // Rand Corporation Report P-923. – 1956. – August. – 13 p.
13. *Moore E.F.* The shortest path through a maze // Proc. of the International Symposium on the Theory of Switching, Part II. Harvard U. Press (Cambridge, Mass., April 1957). – 1957. – P. 285–292.
14. *Yen J.Y.* An algorithm for finding shortest routes from all source nodes to a given destination in general network // Quarterly of Applied Mathematics 27, 4. – 1970. – January. – P. 526–530.
15. *Pallotino S.* Shortest-path methods: complexity, interrelations and new propositions // Networks. – 1984. – Vol. 14. – P. 257–267.
16. *Glover F., Klingman D.D., Phillips N.V., Schneider R.F.* New polynomial shortest path algorithms and their computational attributes // Management Science: 1985. – Vol. 31, N 9, September. – P. 1106–1128.
17. *Dantzig G.B., Blattner W.O., Rao M.R.* All shortest routes from a fixed origin in a graph // Proc. of International Symposium on Theory of Graphs (Rome, July 1966). – Gordon and Breach, New-York, 1967. – P. 85–90.
18. *Gabow H.N.* Scaling algorithms for network problems // Journal of Computer and System sciences 31: 1985. – P. 148–168.
19. *Gabow H.N., Tarjan R.E.* Faster scaling algorithms for network problems // SIAM Journal on Computing. – 1989. – Vol. 18, N 5. – P. 1013–1036.
20. *Goldberg A.V., Radzik T.* A heuristic improvement of the Bellman–Ford algorithm // Applied Mathematics Letters. – 1993. – Vol. 6, N 3. – P. 3–6.
21. *Cherkassky B.V., Goldberg A.V., Radzik T.* Shortest path algorithms: theory and experimental evaluation // In proceedings of 5th ACM–SIAM Symposium on Discrete Algorithms. – 1994. – P. 516–525.
22. *Седжвик Р.* Фундаментальные алгоритмы на C++. Алгоритмы на графах: Пер. с англ. Роберт Седжвик. – СПб: ООО «ДиаСофтЮП», 2002. – 496 с.
23. *Narvaez P., Siu K.-Y., Tzeng H.-Y.* New dynamic algorithms for shortest path tree computation // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 2000. – Vol. 8, N 6, December. – P. 734–746.
24. *Ramalingam G., Reps T.* On the computational complexity of dynamic graph problems // Theoretical Computer Science. – 1996. – Vol. 158, Issue 1–2, May. – P. 233–277.
25. *Frigioni D., Marchetti-Spaccamela A., Nanni U.* Fully dynamic algorithms for maintaining shortest path trees // Journal of Algorithms 34. – 2000. – P. 251–281.
26. *Frigioni D., Marchetti-Spaccamela A., Nanni U.* Fully dynamic shortest path in digraphs with arbitrary arc weights // J. of Algorithms 49. – 2003. – P. 86–113.
27. *Bruce A. Reed.* Algorithmic aspects of tree width / Ed. Bruce A. Reed and Cl'audia L. Sales // Recent Advances in Algorithms and Combinatorics. – 2003. – Springer. – P. 85–107.
28. *Zhan F.B., Noon C.E.* Shortest path algorithms: an evaluation using real road networks // Transportation Science. – 1998. – Vol. 32, N 1, February. – P. 65–73.
29. Generating all vertices of a polyhedron is hard / *L.Khachiyan, E.Boros, K.Borys et al.* // Proc. of the 17th annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms SODA '06. – 2006, January. – P. 758–765.
30. *Рейнгольд Э., Нивергельт Ю., Део Н.* Комбинаторные алгоритмы. Теория и практика. – М.: Мир, 1980. – 476 с.
31. *Yamada T., Kinoshita H.* Finding all the negative cycles in a directed graph // Discrete Applied Mathematics. – 2002. – Vol. 118. – P. 279–291.
32. *Schiele W.L.* Compaction with incremental over-constraint resolution // In Proc. 25th ACM/IEEE Design Automation Conference. – 1988. – P. 390–395.
33. *Ishima K., Tsukiyama S., Shinoda S.* An algorithm to detect positive cycles in a constraint graph for layout compaction // In Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems. – 1990. – P. 2853–2856.
34. *Imai H.* Notes on the one-dimensional compaction problem of LSI layouts viewed from network flow theory and algorithms // The transactions of the IECE of Japan. – 1986. – Vol. E 69, N 10, October. – P. 1080–1083.

Статья поступила 23 мая 2006 г.

Малинаускас Костас Костович – аспирант кафедры высшей математики № 1 МИЭТ. Область научных интересов: математическое и программное обеспечение САПР СБИС, задачи физического проектирования интегральных микросхем; дискретная математика и теоретико-графовые задачи; вычислительная геометрия и диаграммы Вороного на плоскости; сложность алгоритмов.

Моделирование интегральных магниточувствительных схем на основе магниторезистивных элементов

Ю.М.Кобзев, В.В.Эннс

ЗАО «Дизайн центр «Союз» (г. Москва)

В.И.Эннс

ОАО «Ангстрем» (г. Москва)

Приведены особенности проектирования микросхем датчиков магнитного поля на основе интегрированного магниторезистивного моста, повышающие их устойчивость к технологическим и эксплуатационным разбросам. Описана модель магниторезистивного моста, используемая при проектировании ИС. Рассмотрены схемотехнические приемы повышения устойчивости на примере датчика магнитного поля для широкого применения.

Резистивный делитель интегральной схемы, выполненной на основе магниторезистивной пленки, характеризуется большим разбросом параметров, вызванным вариацией технологических процессов и условий эксплуатации. Первоочередной задачей проектирования ИС является разработка встраиваемой в САПР модели магниторезистивного моста, адекватно описывающей его поведение. Использование такой модели позволит оптимизировать периферийные схемы обработки сигналов с магниторезисторов.

Помимо тщательной оптимизации схемы для построения ИС, не чувствительных к технологическим и эксплуатационным разбросам, необходимо использовать специальные схемотехнические приемы, в частности настройку ИС с помощью пережигаемых перемычек и температурную компенсацию.

Свойства магниторезистора. Электрическое сопротивление некоторых ферромагнетиков зависит от угла между вектором намагниченности материала и направлением тока (магниторезистивный эффект). Сопротивление максимально, если ток течет вдоль, и минимально, если ток течет перпендикулярно направлению намагниченности. Зависимость между удельным сопротивлением ρ и углом между направлением тока и намагниченностью θ имеет вид [1]

$$\rho(\theta) = \rho_l - \Delta\rho \sin^2(\theta),$$

$$\Delta\rho = \rho_l - \rho_t,$$

где ρ_l , ρ_t – удельные сопротивления материала намагниченного вдоль и перпендикулярно направлению протекания тока соответственно. Относительное изменение сопротивления при приложении к образцу магнитного поля определяется выражением

$$\frac{\Delta R}{R} = -\frac{\Delta\rho}{\rho_l} \sin^2(\theta). \quad (1)$$

В отсутствии поля намагниченность образца направлена вдоль определенной оси, формируемой при изготовлении магниторезистора, – так называемой оси легкого намагничивания. При приложении поля H , перпендикулярного этой оси, направление вектора намагниченности изменяется на угол φ . Его можно найти, минимизируя энергию магниторезистора:

$$W = -\mu_0 M H_X \sin \varphi - \mu_0 M H_Y \cos \varphi + \frac{1}{2} \mu_0 H_K \sin^2 \varphi, \quad (2)$$

где M – вектор намагниченности; H_X, H_Y – проекции внешнего магнитного поля вдоль осей легкого и трудного намагничивания; H_K – характеристическое поле анизотропии, определяемое материалом и формой магниторезистора, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м. Полагая, что ось легкого намагничивания направлена вдоль направления тока ($\theta = \varphi$) и угол φ мал, после преобразований получаем из (1) и (2) [2]:

$$R(H) = R - R \frac{\Delta \rho}{\rho_l} \left(\frac{H_X}{H_Y + H_K} \right)^2. \quad (3)$$

На практике при увеличении приложенного поля сопротивление магниторезистора довольно быстро выходит на постоянный уровень, поэтому формула (3) применима лишь при $H_X/H_K < 1$.

Из формулы (3) видно, что наибольшее изменение сопротивления происходит при приложении поля, направленного перпендикулярно оси легкого намагничивания ($H_Y = 0, H_X = H$):

$$R(H) = R - R \frac{\Delta \rho}{\rho_l} \left(\frac{H}{H_K} \right)^2. \quad (4)$$

Формула (4) описывает изменение сопротивления «однодоменной» тонкой полоски магниторезистивного материала в слабом внешнем поле. Коэффициент $\Delta \rho / \rho_l$ определяется составом материала датчика и составляет примерно 1–3%. Характеристическое поле анизотропии H_K определяется типом материала, формой датчика и технологией изготовления.

Небольшие отклонения в размерах магниторезисторов и технологические разбросы производства приводят к существенным изменениям характеристик магниторезистивного моста. В реальном магниторезисторе существуют гистерезис и остаточная намагниченность, вызванные доменностью его структуры. Величина этих эффектов зависит от ряда конструктивных и технологических факторов и плохо воспроизводима. Поэтому при проектировании электрической схемы и топологии магниторезистивного интегрального датчика необходимо учитывать большой разброс характеристик магниторезистивного моста.

Модель магниторезистивного моста. Устойчивое к разбросам проектирование требует наличия данных по технологическому и эксплуатационному разбросу элементов, составляющих микросхему. Для стандартных элементов с хорошо отработанными аналитическими моделями достаточно иметь данные по разбросу параметров, описывающих эти модели.

В том случае, если моделей, описывающих элемент с приемлемой точностью не существует либо они недоступны в системах схемотехнического моделирования, необходимо хранить весь массив экспериментальных данных. При этом важно обеспечить

непосредственный доступ к данным в ходе процесса моделирования, а также аппроксимацию промежуточных точек. Магниторезистивный мост является примером такого элемента.

Магниторезистивный мост обладает большим разбросом характеристик, что объясняется влиянием большого числа технологических и конструктивных факторов на параметры магниторезистивного слоя и малой величиной магниторезистивного эффекта. Использование в данном случае моделей, основанных на аналитических выражениях, малоэффективно, так как, с одной стороны, требует больших затрат на экстракцию параметров моделей, а с другой – большая величина разброса полученных параметров и их комбинаций затрудняет применение подобных моделей.

Структурная схема модели магниторезистивного моста, непосредственно представляющая набор экспериментальных данных, приведена на рис.1.

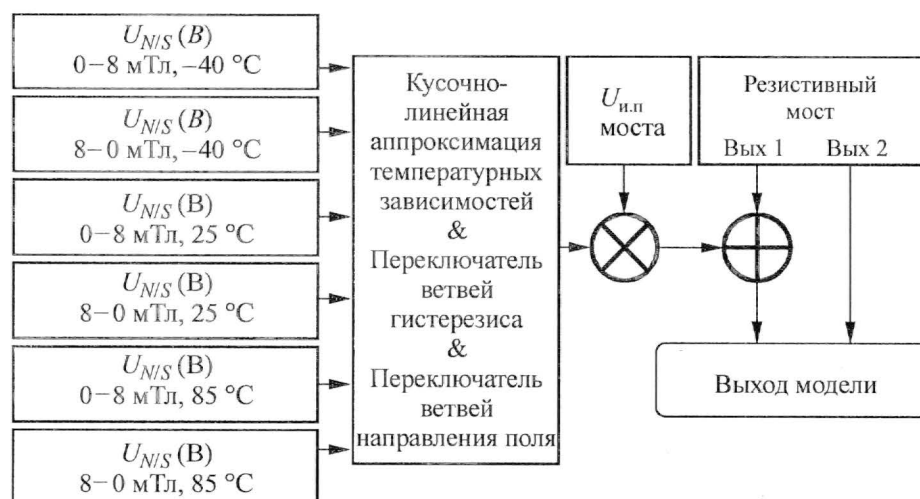


Рис.1. Структурная схема модели моста магниторезистивного датчика

Модель учитывает следующие эффекты:

- 1) сопротивление моста;
- 2) зависимость выходного напряжения моста от напряжения питания;
- 3) зависимости выходного напряжения моста от напряженности приложенного магнитного поля и его направления «север–юг»;
- 4) изменение характеристик моста в зависимости от порядка приложения магнитного поля (гистерезис);
- 5) зависимости перечисленных выше характеристик от температуры.

Модель пригодна для случая медленно изменяющихся полей и не учитывает динамические эффекты.

Входными данными модели для каждого конкретного образца являются экспериментальные зависимости $U_{N/S}(B)$ выходного напряжения моста от величины индукции приложенного магнитного поля B и его направления (N –«север», S –«юг») при фиксированном напряжении питания. Зависимости снимаются как при увеличении индукции поля от нуля до максимального (в данном случае 8 мТл), так и при уменьшении поля от максимального до нуля, что позволяет учесть гистерезис характеристик моста. Измерения проводятся при номинальной (25 °C) и крайних (–40 °C, +85 °C) температурах эксплуатации микросхемы.

Таким образом, один образец моста характеризуют 12 экспериментальных зависимостей, каждая из которых становится доступной в ходе схемотехнического моделирования при помощи системы ключей, управляемых независимыми источниками напряжения. Величина индукции магнитного поля в ходе расчета также эмулируется источником напряжения. Для получения зависимостей при температурах, отличных от температур измерения, используется кусочно-линейная аппроксимация. Зависимости для напряжений питания моста, отличных от напряжения питания при измерении, получаются путем масштабирования на идеальном аналоговом умножителе. Выделенная и преобразованная зависимость суммируется с выходным напряжением резистивного моста модели, который учитывает реальное сопротивление магниторезистивного моста и его температурный коэффициент (без учета магниторезистивных эффектов).

Для каждого конкретного образца на основе экспериментальных данных специально разработанная программная утилита генерирует свою модель (см. рис.1) в виде под-схемы на языке Spice. Сами экспериментальные зависимости в них представлены в виде управляемых источников с кусочно-линейной передаточной характеристикой. Все полученные модели хранятся в памяти компьютера. Из них при каждом запуске для моделирования непосредственно доступными оказываются двадцать (при необходимости это число можно увеличить), выбор каждой из них в процессе моделирования осуществляется с помощью дополнительного параметра (относительного номера моста). Выборка доступных моделей может осуществляться как случайным образом, так и по критериям (номер партии и т.п.), с помощью дополнительной программной утилиты. Кроме того, доступной является модель, усредненная по двадцати выбранным образцам.

Схемотехнические способы повышения устойчивости к технологическим и эксплуатационным разбросам. Датчики магнитного поля, которые используются в качестве датчиков положения (типа «открыт – закрыт»), как правило, имеют настройку порога срабатывания на уровень в диапазоне 1–3 мТл [3]. При этом производителями предъявляются жесткие требования по разбросу порога срабатывания датчика в нормальных условиях. Типовое значение порога переключения в нашем случае должно составлять 2 мТл при допустимом отклонении $\pm 15\%$ в нормальных условиях.

Порог переключения компаратора, как правило, устанавливается с помощью дополнительных резистивных делителей, выполненных из высокоомных слоев (например, из высокоомного поликремния) (R_1, R_2), (R_3, R_4) (рис.2,а). При этом для минимизации влияния разброса резистивных делителей они должны выполняться по правилам построения согласованных резисторов [4]. Схемотехническое и топологическое построение компараторов также должно обеспечивать минимизацию смещения нуля. Тем не менее без использования схем автокоррекции смещения нуля в стандартной КМОП-технологии трудно получить среднеквадратическое отклонение смещения нуля меньше 1 мВ без существенного увеличения площади компаратора.

На рис.3 приведено семейство передаточных характеристик магниторезистивного моста в интересующем диапазоне величин магнитного поля, полученных при увеличении поля от нуля до 8 мТл. Эти характеристики определяют порог срабатывания датчика. Анализ характеристик показывает, что даже без учета погрешностей, вносимых наличием резистивных делителей и компараторов, значительная часть образцов окажется отбракованной из-за разброса передаточных характеристик моста. Ситуация значительно ухудшается, если учесть технологический разброс смещений нуля компараторов ($3\sigma = 3$ мВ).

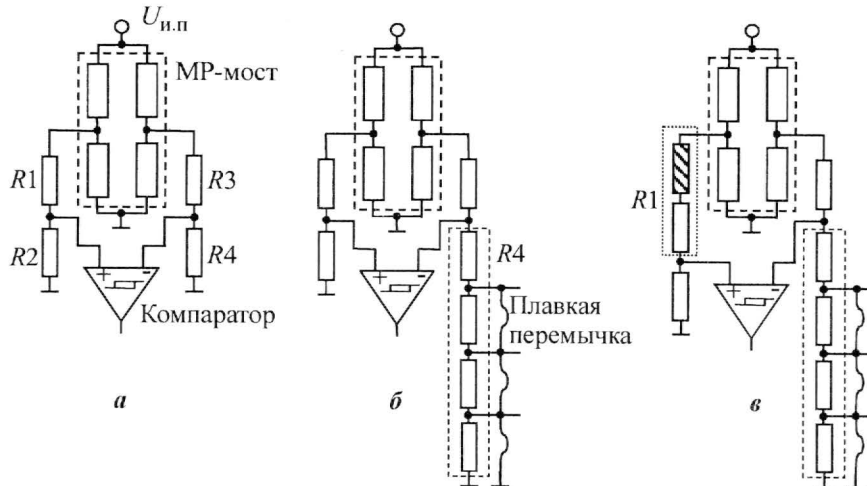


Рис.2. Способы повышения устойчивости магниторезистивного датчика к технологическим и эксплуатационным разбросам

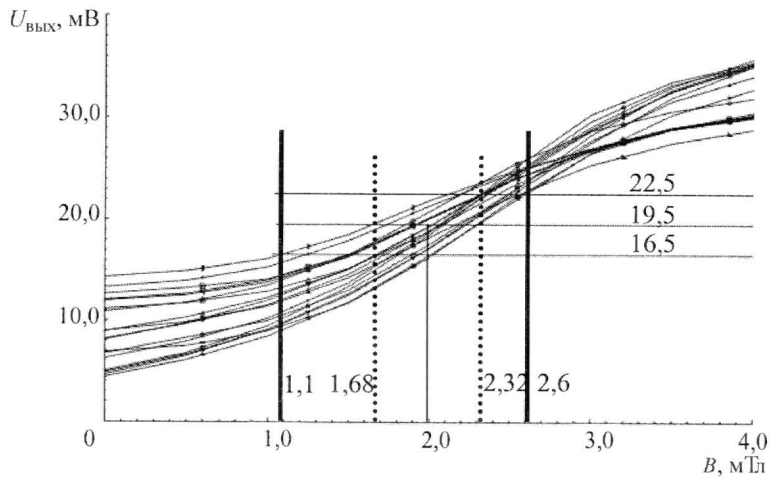


Рис.3. Границы порога переключения датчика без подстройки порога переключения компаратора: без разброса смещения нуля компаратора; — с разбросом

Одним из приемов, повышающих устойчивость микросхем к технологическому разбросу, является введение цепей индивидуальной подстройки кристалла по критическому параметру в ходе измерения на пластине [4]. В нашем случае таким параметром является порог срабатывания датчика.

Индивидуальная подстройка порога срабатывания позволяет компенсировать основные факторы, которые влияют на порог срабатывания датчика в нормальных условиях (разброс передаточных характеристик магниторезистивного моста, рассогласование резистивных делителей, разброс смещений нуля компараторов).

На рис.2,б показан способ введения индивидуальной подстройки с помощью модификации одного из резистивных делителей. Резистор R4 разбивается на постоянную и подстраиваемую части. Соотношение сопротивлений частей выбирается исходя из необходимого диапазона подстройки. Резисторы, которые входят в цепь подстройки, обычно образуют двоичный ряд ($R, R/2, R/4, \dots$). Число подстроечных резисторов определяет минимальный шаг настройки. Настройка осуществляется за счет удаления плав-

ких перемычек, которые в исходном состоянии шунтируют подстроечные резисторы. Удаление перемычек может осуществляться как с помощью лазера, так и электрическим способом. В последнем случае перемычки располагаются между дополнительными контактными площадками, которые не развариваются в корпусе.

На основе анализа совокупности экспериментальных данных, диапазон подстройки порога переключения компаратора выбран равным 14 мВ с минимальным шагом 2 мВ. Это обеспечивается использованием трех подстроечных резисторов, последовательное включение которых образует ряд: 8, 4, 2 мВ.

Использование индивидуальной подстройки кристаллов позволило сузить границы порога переключения датчика до 0,3 мТл при центральном значении 2 мТл в нормальных условиях.

Другим важным моментом, определяющим свойства магниторезистивного датчика, является температурная стабильность его характеристик. Анализ экспериментальных данных показывает, что ряд образцов, которые признаны годными в нормальных условиях, в крайних точках температурного диапазона эксплуатации -40 и $+85$ °C могут полностью потерять работоспособность.

Повышение устойчивости характеристик датчика к изменениям температуры эксплуатации (или расширение температурного диапазона эксплуатации) возможно за счет введения цепей температурной коррекции.

Температурная коррекция в датчике осуществляется с помощью температурной коррекции порога переключения компаратора. Температурная зависимость порога переключения компаратора вводится за счет модификации одного из резистивных делителей, формирующих напряжение порога переключения. В состав резистора $R1$ (рис.2,б) добавляется резистор, выполненный из материала с температурным коэффициентом, отличающимся от температурного коэффициента резисторов остальной части делителя.

Для достижения требуемой температурной коррекции по совокупности экспериментальных данных оказалось достаточным ввести небольшой (6 кОм) карманный резистор по сравнению с общим сопротивлением $R1$ (около 70 кОм). На рис.4 показано

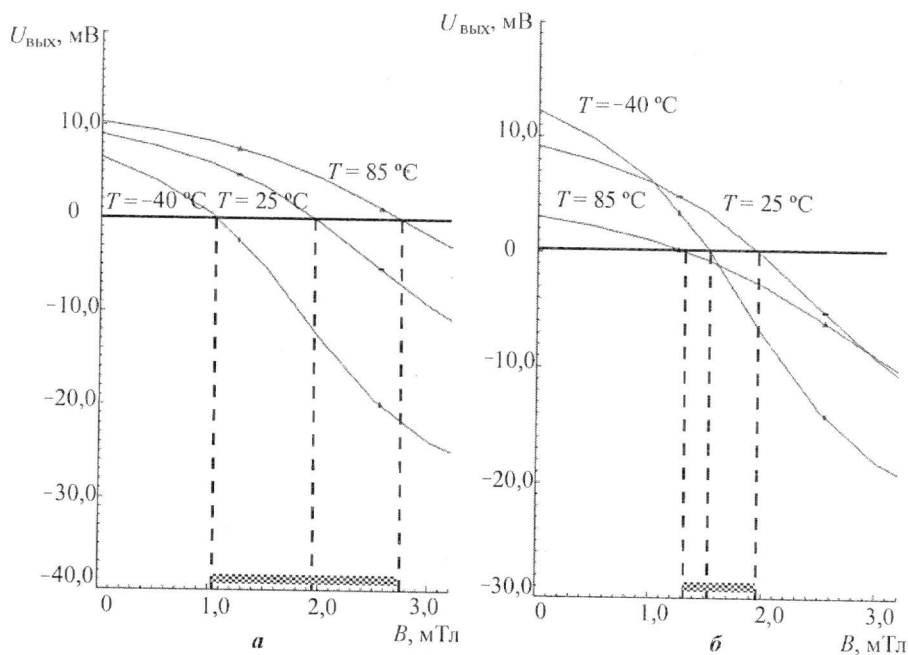


Рис.4. Диапазоны изменения порога переключения с температурой

семейство кривых (для одного образца) разностного напряжения, подаваемого на вход компаратора до (рис.4,а) и после (рис.4,б) введения температурной коррекции.

В среднем для различных образцов введение температурной коррекции сужает разброс порогов срабатывания датчиков более чем в два раза и исключает появление неработоспособных образцов на краях температурного диапазона.

Экспериментальные результаты. Рассмотренные в статье подходы были использованы при проектировании КМОП интегральной схемы магниторезистивного датчика.

Область применения описываемой микросхемы датчика предусматривает достаточно медленное изменение магнитного поля (характерное время – сотни миллисекунд). В целях экономии потребляемой мощности в схему датчика введен дополнительный блок управления, который подключает мост и аналоговые цепи к питанию со скажностью 1024. Во время паузы последнее значение с выхода компаратора хранится в триггере. Структурная схема микросхемы датчика приведена на рис.5.

Электрическая схема компаратора имеет низковольтное исполнение, что при использовании низкороговой технологии позволяет снизить напряжение питания до 1,6. При использовании технологии с проектными нормами 1 мкм рабочий диапазон напряжений питания микросхемы датчика составляет 1,6–6 В.

При проектировании электрической схемы и топологии микросхемы датчика помимо достижения устойчивости к разбросам ставилась цель минимизации площади кристалла, которая была достигнута за счет максимального упрощения схемотехнических решений без ущерба эксплуатационным характеристикам микросхемы. Описанные выше способы повышения устойчивости к разбросам позволили существенно снизить требования к параметрам узлов, входящих в состав микросхемы, а также к параметрам самого магниторезистивного моста.

Общий вид топологии кристалла датчика, выполненного на базе КМОП-технологии, показан на рис.6. Площадь полученного кристалла ($0,7 \times 0,7$ мм) ограничивается размерами магниторезистивного моста и контактными площадками. При этом выполнено одно из важных требований, существенно удешевляющих технологический процесс, – отсутствие элементов схемы по всей площади, занимаемой магниторезистивным мостом.

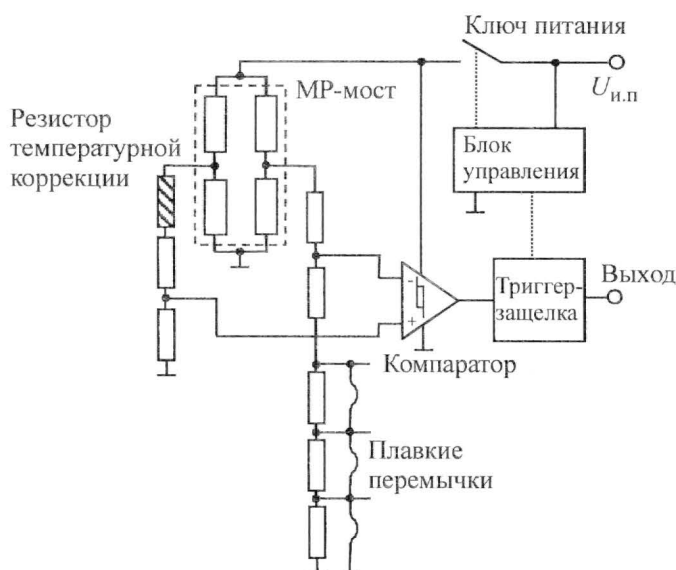


Рис. 5. Блок-схема микросхемы датчика

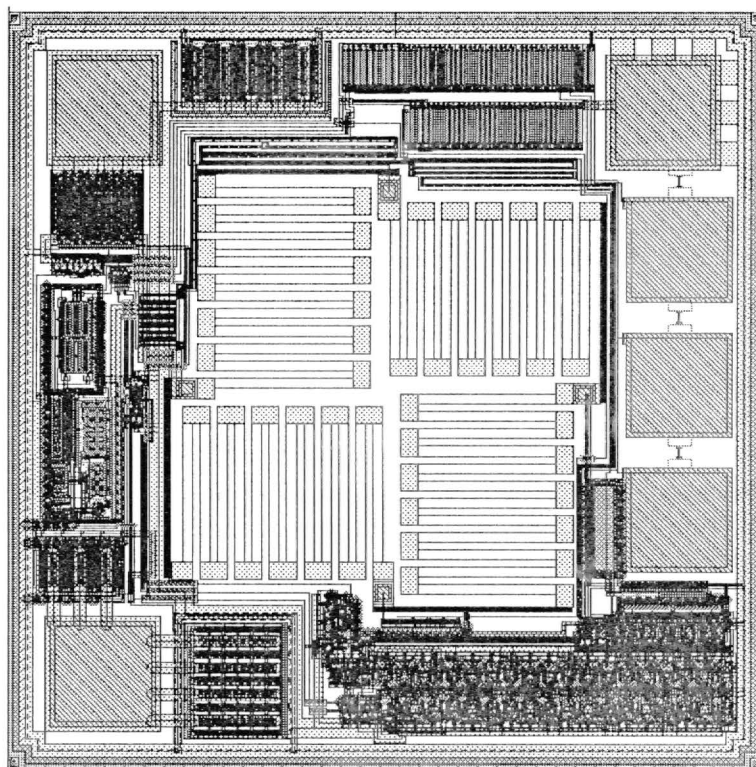


Рис. 6. Общий вид топологии микросхемы магниторезистивного датчика

Эти факторы обеспечили высокие технико-экономические показатели для данного класса микросхем (таблица).

**Экспериментальные характеристики КМОП
интегрированного магниторезистивного датчика**

Название	Значение	Условия измерения
Диапазон рабочих напряжений питания, В	1,6–6,0	—
Средний потребляемый ток, мкА	3	$U_{\text{пит}} = 3 \text{ В}$
Температурный диапазон, °С	от –40 до +85	—
Порог переключения датчика, мТл	2,0	$T = 27 \text{ °С}$
	1,0	$T = -40 \text{ °С}$
	2,8	$T = 85 \text{ °С}$

Таким образом, применение описанных способов и методов моделирования позволило разработать микросхему магниторезистивного датчика для широкого применения.

Литература

1. *Tumanski S.* Thin film magnetoresistive Sensors. – U.K., IOP Publishing Ltd, 2001. – 576 p.
2. *Andreev S., Dimitrova P.* Anisotropic – magnetoresistance integrated sensors / J. of Optoelectronics and Advanced Materials. – 2005. – Vol. 7. – N 1. – P. 199–206.
3. NEC Corporation. MRSS22L: – Data Sheet, 2005, September. – 4 p.
4. *Эннс В.И., Кобзев Ю.М.* Проектирование аналоговых КМОП-микросхем: Краткий справочник разработчика / Под ред. В.И. Эннса. – М.: Горячая линия – Телеком. – 2005. – 454 с.

Статья поступила
25 мая 2006 г.

Кобзев Юрий Михайлович – кандидат технических наук, заместитель генерального директора по науке ЗАО «Дизайн центр «Союз» (г. Москва). *Область научных интересов:* методы проектирования аналоговых КМОП ИС.

Эннс Всеволод Викторович – генеральный директор ЗАО «Дизайн центр «Союз» (г. Москва). *Область научных интересов:* методы проектирования аналоговых КМОП ИС.

Эннс Виктор Иванович – кандидат технических наук, начальник отдела проектирования цифроаналоговых схем ОАО «Ангстрем» (г. Москва) *Область научных интересов:* методы проектирования аналоговых КМОП ИС.



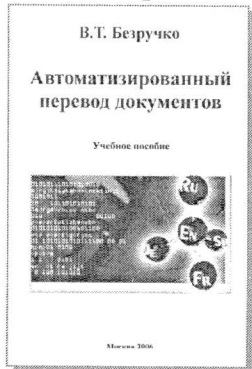
Издательско-полиграфический комплекс
Московского государственного института электронной техники
информирует



Вышло в свет учебное пособие

В.Т. Безручко

Автоматизированный перевод документов



ISBN 5-7256-0431-4
Формат 60 x 84 1/16,
объем 428 с.: ил.

Рассмотрены ключевые понятия и общетеоретические вопросы базового курса "Информатика". Приведены основные определения и сведения об аппаратном и программном обеспечении компьютера, особенностях современных операционных систем (Windows 2000/XP/2003) и прикладного программного обеспечения офисного назначения (Microsoft Office 2000). Представлена технология работы с документами в программах Word, Excel, PowerPoint и работа в сети Интернет.

Для студентов, изучающих курс "Информатика", готовящих к защите курсовые и дипломные работы, а также для преподавателей и специалистов любой предметной области при самостоятельном освоении компьютерных технологий и подготовке публикаций, выступлений, докладов на семинарах, конференциях и т.п.

Учебное пособие выполнено в рамках реализации национального проекта «Образование» по инновационной образовательной программе «Современное профессиональное образование для российской инновационной системы в области электроники».

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.396.97

Интегрированные устройства цифрового сопряжения, мультиплексирования и каналообразования для радиорелейных линий связи

Е.Е.Янчук

ЗАО «РИССА» (г. Москва)

Описано интегрированное устройство для радиорелейных линий связи, включающее средства сопряжения, мультиплексирования и каналообразования, а также схемы инкапсуляции и мультиплексирования виртуальных контейнеров при обработке высокоскоростных и низкоскоростных потоков. Показано, что использование разработанного устройства дает возможность значительно увеличить эффективность организации многофункциональных систем каналообразования и мультиплексирования для цифровых сетей связи с плезиохронной и синхронной цифровой иерархией.

В настоящее время актуальной является задача создания интегрированного устройства для радиорелейных линий связи, включающего средства сопряжения, мультиплексирования и каналообразования в рамках единой унифицированной платформы, объединяющей все существующие типы интерфейсов, задач кроссовой коммутации и обработки сигнализации. Разработка такого устройства сопряжена с большим набором технических проблем, главными из которых являются:

- синхронизация различных интерфейсов с различными скоростями передачи данных;
- кроссовая коммутация не только на уровне трибутарных потоков и потоков E1, но и на уровне канальных интервалов;
- интеграция как синхронного, так и асинхронного трафика в рамках интегрированного устройства.

Основой данного решения является идеология высокоскоростной системной шины, базирующейся на спецификации стандартов STM – синхронных транспортных модулей с пропускной способностью 20 Гбит/с. Для реализации интегрированного устройства цифрового сопряжения был разработан новый подход, опирающийся на следующие принципы:

- каждая плата является функционально независимым устройством, обеспечивающим требуемые линейные интерфейсы со стороны канала связи и интерфейс STM со стороны системной шины;
- в каждой плате независимо от функционального назначения реализованы функции кроссовой коммутации ;
- система двухконтурного вторичного электропитания осуществляет контроль потребления электроэнергии устройствами и при аварийных ситуациях автоматически исключает из рабочего тракта поврежденные блоки;

© Е.Е.Янчук, 2006

- все высокоскоростные блоки наделены функцией контроля состояния высокоскоростной шины, что позволяет автоматически исключать из тракта как сам блок, так и модули, вносящие искажение в работу системной шины;

- каждый модуль обеспечивает функцию контроля, выравнивания синхронизации и устранения джитера, что устраняет сбой синхронизации как внутри одного блока, так и в рамках произвольного количества блоков (крейтов);

- система управления, базирующаяся на протоколах SNMP, имеет единые принципы для всех модулей независимо от их функционального назначения и может осуществлять управление системой в целом через любой модуль.

На рис.1 представлена структурная схема интегрированного устройства цифрового сопряжения (ИУЦС). Модули цифрового сопряжения выполняют функции:

- сопряжения аппаратуры радиорелейных станций по цифровым стыкам С1-И, RS-232, RS-485, G.703, G.957 и xDSL;

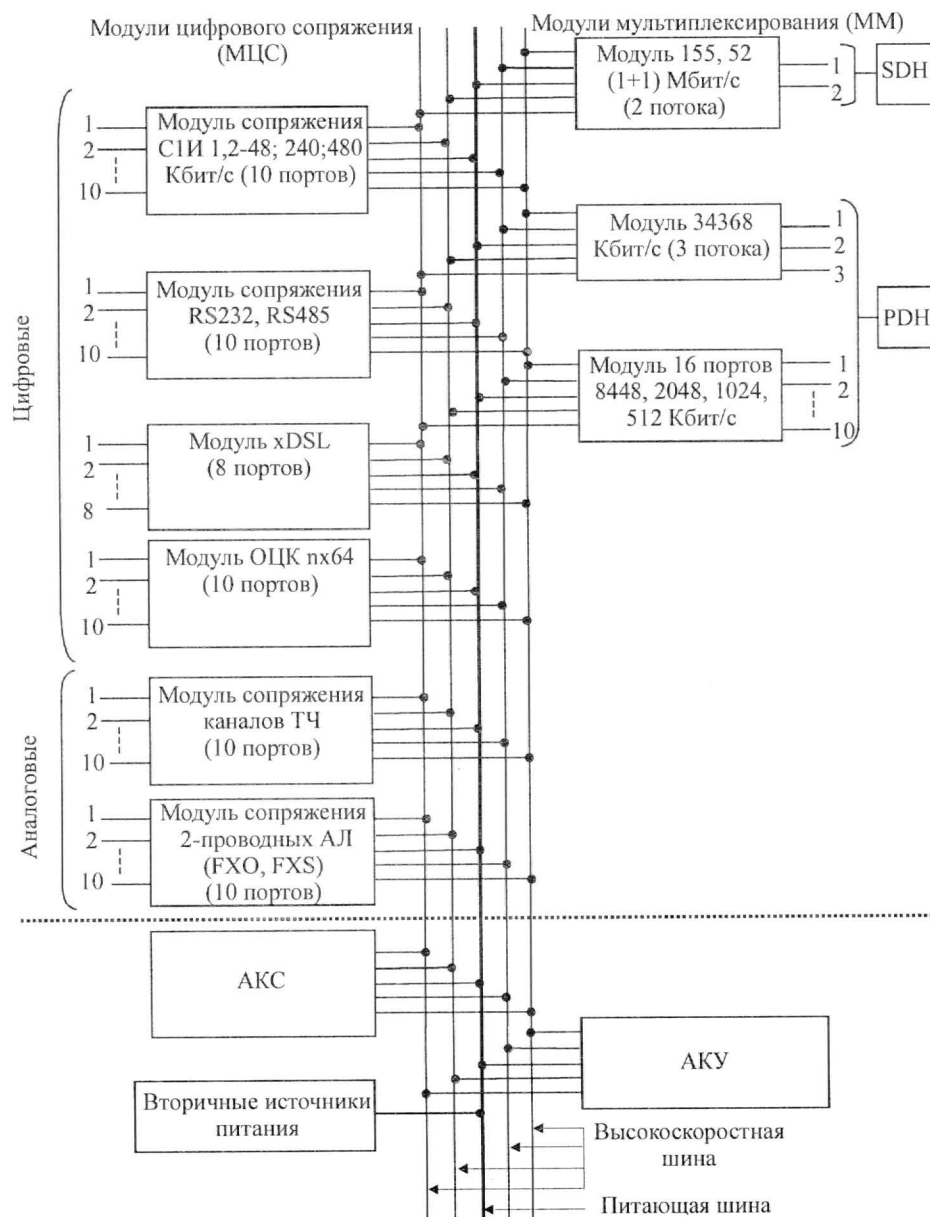


Рис.1. Структурная схема интегрированного устройства цифрового сопряжения

- управления цифровыми потоками, оперативного контроля и сигнализации о состоянии аппаратуры радиорелейных линий;
- сопряжения с аналоговыми сигналами 2-проводных абонентских линий, 3-, 4-проводных соединительных линий, каналами ТЧ.

Модули мультиплексирования предназначены для образования групповых цифровых потоков, передаваемых по радиорелейным линиям связи с информационной скоростью 512, 1024, 2048, 8448, 34368 и 155520 Кбит/с.

В качестве дополнительной аппаратуры может использоваться аппаратура кроссовых соединений (АКС) и аппаратура контроля и управления (АКУ).

Аппаратура кроссовых соединений предназначена для автоматизированной полностью доступной кроссовой коммутации линейных трактов.

Аппаратура контроля и управления предназначена для управления цифровыми потоками, оперативного контроля за состоянием аппаратуры, линий и каналов связи, обеспечения сигнализации.

Приходящие с внешнего кроссового оборудования потоки распределяются на соответствующие модули цифрового сопряжения с интерфейсами: цифровой стык С1-И; RS-232; RS-485 и каналами: ТЧ, FXO, FXS;

После мультиплексирования/демультиплексирования цифровые сигналы поступают на высокоскоростные шины. С каждой шины цифровые сигналы считываются необходимыми модулями и для составления единого цифрового потока поступают в АКС. Блок-схема высоко-/низкоскоростных модулей интегрированного устройства цифрового сопряжения представлена на рис.2. Сформированные потоки через шину направляются в необходимые модули мультиплексирования, после чего выдаются на внешнее кроссовое устройство. Использование в устройстве высокоскоростных модулей дает возможность организации цифровых сетей связи с плезиохронной цифровой иерархией (Plesiochronous Digital Hierarchy – PDH) и синхронной цифровой иерархией (Synchronous Digital Hierarchy – SDH).

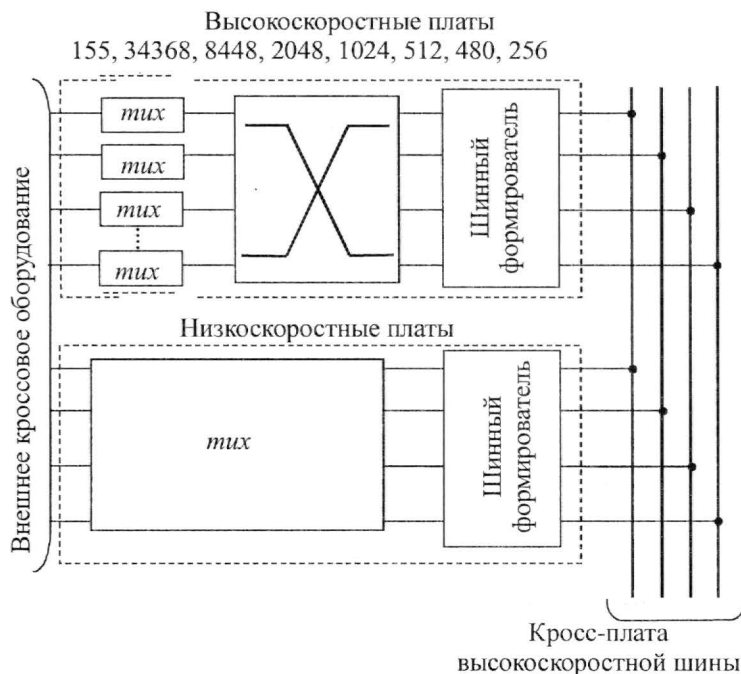


Рис.2. Блок-схема высокоскоростных/низкоскоростных модулей

Основу работы с высокоскоростными модулями PDH составляет использование схемы мультиплексирования с байт-интерливингом (чередованием байтов). В результате этого сформированный фрейм должен иметь длину, кратную байту. Однако добавление синхронизирующих и сигнализирующих бит нарушает эту кратность не только на уровне фрейма, но и на уровне мультифрейма. Кроме того, при использовании каскадного мультиплексирования даже при достаточно жесткой, но локальной синхронизации входных последовательностей, подаваемых на мультиплексор, приходится выравнивать цифровые последовательности перед мультиплексированием, добавляя выравнивающие биты к входным цифровым последовательностям (т.е. осуществляя так называемую процедуру стаффинга). Это приводит к тому, что, начиная с формирования вторичных цифровых каналов, приходится использовать схему мультиплексирования с бит-интерливингом (чередованием битов), что делает невозможным идентификацию байтов каждого канала в общем потоке.

Кроме синхронизации на уровне мультиплексора второго порядка также происходит формирование фреймов и мультифреймов для структурирования последовательности в целом, что позволяет получать информацию о сигнализации, аварийных ситуациях и кодовых комбинациях избыточных кодов CRC, используемых для обнаружения ошибок в принятых фреймах. Передача данных на скорости 64 Кбит/с на основе протокола пакетной коммутации X.25 выявила ряд особенностей PDH-технологии. Их суть в том, что добавление выравнивающих бит делает невозможным идентификацию и ввод/вывод более низкоскоростного потока, «зашифтого» в более высокоскоростной поток, без полного демуплексирования этого потока и удаления выравнивающих бит. Осуществляя такой ввод/вывод, приходится проводить относительно сложную операцию двухуровневого демуплексирования («расшивания») PDH-сигнала с удалением/добавлением выравнивающих (на всех трех уровнях) бит и его последующего двухуровневого мультиплексирования («сшивания») с добавлением новых выравнивающих бит.

Другое узкое место построения PDH – слабые возможности в организации служебных каналов для целей контроля и управления потоком в сети и практически полное отсутствие средств маршрутизации мультиплексированных потоков нижних уровней, что крайне важно для использования систем PDH для радиорелейных линий связи. Указанные недостатки PDH привели к необходимости использования синхронной цифровой иерархии SDH [1–3], допускающей меньшее затухание при большей допустимой скорости передачи.

Иерархия SDH включает в себя несколько уровней STM синхронных транспортных модулей. В качестве формата основного сигнала первого уровня в иерархии SDH был принят синхронный транспортный модуль STM-1, скорость передачи которого 155.52 Мбит/с. Мультиплексирование с коэффициентом кратности 4 дает следующий ряд скоростей SDH-иерархии: STM-4, STM-16, STM-64 или соответственно 622.08, 2488.32, 9953.28 Мбит/с.

Синхронная цифровая иерархия поддерживает в качестве входных сигналов каналов доступа только трибы (trib, tributary – компонентный сигнал, подчиненный сигнал или нагрузка, поток нагрузки) PDH и SDH. Для реализации этого метода используется понятие контейнер, в который и упаковывается триб. При организации трактов с использованием модулей высокоскоростных потоков трибы должны быть упакованы в стандартные помеченные контейнеры, размеры которых определяются уровнем триба в иерархии PDH.

Виртуальные контейнеры могут объединяться в группы двумя различными способами. Контейнеры нижних уровней могут, например, мультиплексироваться и использоваться в качестве полезной нагрузки контейнеров верхних уровней, которые, в свою

очередь, служат полезной нагрузкой контейнера самого верхнего уровня – фрейма STM-1. Такое группирование может осуществляться по жесткой синхронной схеме, при которой место отдельного контейнера в поле для размещения нагрузки строго фиксировано. С другой стороны, из нескольких фреймов могут быть составлены новые (более крупные) образования – мультифреймы.

В результате возможных различий в типе составляющих контейнеров и временных флуктуаций в процессе загрузки фрейма положение контейнеров внутри мультифрейма может меняться, что зачастую приводит к ошибке при вводе/выводе контейнера. Для устранения этого факта на каждый виртуальный контейнер заводится указатель, содержащий фактический адрес начала виртуального контейнера на карте поля, отведенного под полезную нагрузку. Указатель дает контейнеру некоторую степень свободы, т.е. возможность «плавать» под действием непредвиденных временных задержек, но при этом гарантирует, что он не будет потерян.

Хотя размеры контейнеров различны, а емкость контейнеров верхних уровней достаточно велика, может оказаться так, что либо она все равно недостаточна, либо под нагрузку лучше выделить несколько (в том числе и с дробной частью) контейнеров меньшего размера. Для этого предусмотрена возможность сцепления или стыковки контейнеров (составление нескольких контейнеров вместе в одну структуру, называемую составным контейнером или сцепкой). Составной контейнер отличается от основного наличием индекса «С» и рассматривается (с точки зрения размещения нагрузки) как один большой контейнер. Указанная возможность позволяет, с одной стороны, оптимизировать использование имеющейся номенклатуры контейнеров для размещения нестандартной полезной нагрузки, с другой – позволяет легко приспособить технологию к передаче новых типов нагрузок, не известных на момент ее разработки.

Разработанная с учетом указанных общих принципов схема инкапсуляции PDH трибов в контейнеры и их последующего мультиплексирования при формировании модуля STM-1 представлена на рис.3. В этой обобщенной схеме мультиплексирования используются следующие основополагающие обозначения: C- n – контейнеры уровня n ($n = 1, 2, 3, 4$); VC- n – виртуальные контейнеры уровня n ($n = 1, 2, 3, 4$); TU- n – трибные блоки уровня n ($n = 1, 2, 3$), TUG- n – группы трибных блоков уровня n ($n = 2, 3$), AU- n – административные блоки уровня n ($n = 3, 4$); AUG – группа административных блоков и STM-1 синхронный транспортный модуль.

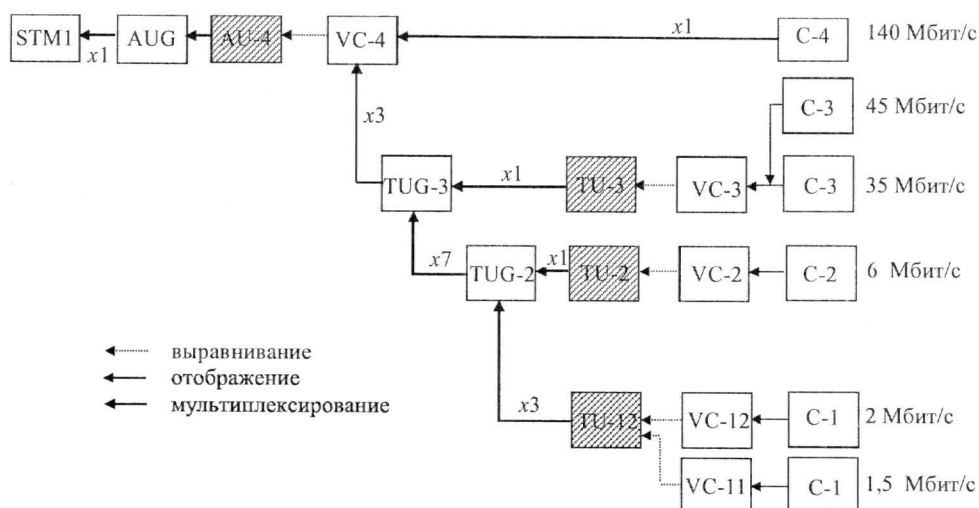


Рис.3. Схема инкапсуляции PDH трибов в контейнеры и их последующего мультиплексирования при формировании модуля STM-1

Контейнеры $C-n$ служат для инкапсуляции (размещения с целью последующей передачи) соответствующих трибов PDH на входах. Уровни контейнера n соответствуют уровням PDH-иерархии, т.е. $n = 1, 2, 3, 4$, а число типоразмеров контейнеров n должно быть равно числу членов объединенного стандартного ряда, т.е. 6. Схема инкапсуляции и мультиплексирования трибов в контейнеры состоит в следующем.

$C-n$ – контейнер уровня n – элемент SDH, содержащий триб Tn ; контейнеры $C-1$ и $C-3$ разбиваются на следующие контейнеры подуровней $C-nm$.

Контейнер $C-1$ разбивается на контейнеры $C-11$ и $C-12$, инкапсулирующие трибы $T1 = 1,5$ Мбит/с и $E1 = 2$ Мбит/с соответственно.

Контейнер $C-3$ разбивается на контейнеры $C-31$ и $C-32$, инкапсулирующие трибы $E3 = 34$ Мбит/с и $T3 = 45$ Мбит/с соответственно. Tn, En – трибы PDH-уровня n (или компонентные сигналы), соответствующие объединенному стандартному ряду иерархий PDH.

Контейнеры можно рассматривать в качестве первых элементов в номенклатуре элементов иерархии SDH. К контейнеру добавляется маршрутный (или трактовый) заголовок. В результате он превращается в виртуальный контейнер VC уровня n , т.е. $VC-n$. Существуют следующие виртуальные контейнеры: $VC-1, VC-2$ – виртуальные контейнеры нижних уровней 1 или 2 и $VC-3, VC-4$ – виртуальные контейнеры верхних уровней 3 или 4, формат которых определяется формулой $POH + PL$, где POH – маршрутный заголовок; PL – полезная нагрузка. Виртуальные контейнеры $VC-1, VC-3$ уровней 1, 3, так же как и контейнеры $C-1, C-3$, разбиваются на виртуальные контейнеры подуровней nm , т.е. $VC-nm$, а именно: $VC-1$ разбивается на $VC-11$ и $VC-12$; $VC-3$ разбивается на $VC-31$ и $VC-32$.

Кроссовые соединения осуществляются в АКС на одном или нескольких следующих уровнях: $VC-4; VC-3; VC-2; VC-12$.

Поля PL и POH виртуального контейнера имеют следующий вид.

PL – поле, размер которого зависит от типа виртуального контейнера, а формат имеет двумерную структуру типа $9 \times m$ (9 строк, m столбцов); это поле формируется либо из контейнеров соответствующего уровня (например, для $VC-1, 2$ оно формируется из $C-1, 2$ соответственно), либо из других элементов структуры мультиплексирования SDH.

POH – поле размера 9 байт, формат которого имеет структуру вида $1 \times n$ (например, формат 1×9 байт для $VC-4$ или $VC-32$ и формат 1×6 байт для $VC-31$).

$TU-n$ – трибные блоки уровня n ($n = 1, 2, 3$) – элементы структуры мультиплексирования SDH, формат которых определяется формулой: $PTR + VC$, где PTR – указатель трибного блока ($TU-n PTR$), относящийся к соответствующему $VC-n$, например $TU-1 = (TU-1 PTR) + VC-1$. Трибные блоки уровня n , как и виртуальные контейнеры, делятся на трибные блоки подуровней nm , т.е. $TU-nm$, а именно: $TU-1$ разбивается на $TU-11$ и $TU-12$; $TU-3$ разбивается на $TU-31$ и $TU-32$.

$TUG-n$ – группа трибных блоков уровня n ($n = 2, 3$), формируемая в результате мультиплексирования нескольких трибных блоков. На рис.3 $TUG-2$ используется для мультиплексирования $TU-11, 12, 2$, тогда как $TUG-3$ – для мультиплексирования $TU-3$ и $TUG-2$.

На рис.4 показан процесс формирования синхронного транспортного модуля STM-1 из нагрузки потока $E1$ для ИУЦС. Как видно из рисунка, в процессе формирования синхронного транспортного модуля к нагрузке сначала добавляются выравнивающие биты, а также фиксированные, управляющие и упаковывающие биты. К сформированному контейнеру $C-12$ добавляется заголовок маршрута $VC-12 POH$ (Path Overhead), в результате формируется виртуальный контейнер.

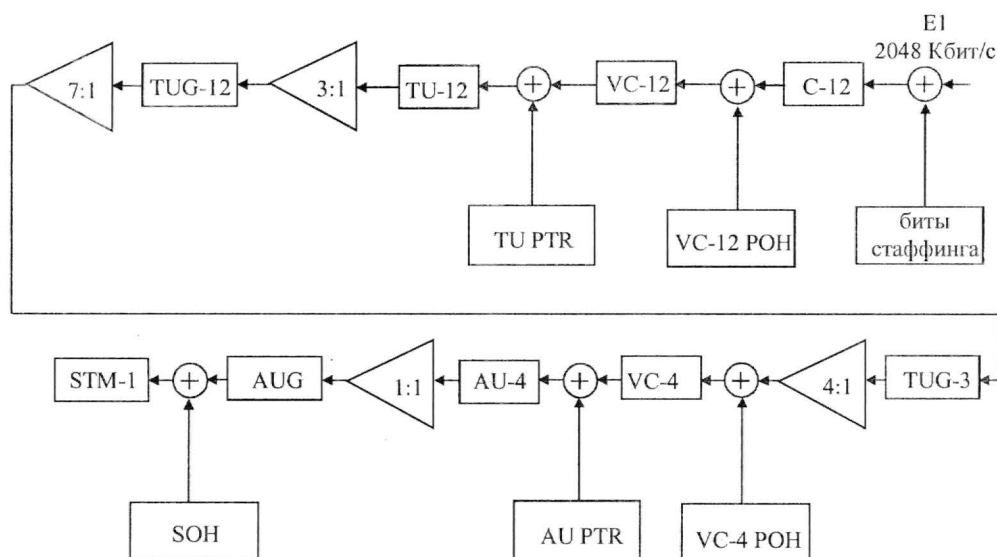


Рис.4. Формирование синхронного транспортного модуля STM-1 из нагрузки потока E1 в интегрированном устройстве

Добавление к виртуальному контейнеру байта указателя (PTR) превращает первый в блок нагрузки (TU). Затем происходит процедура мультиплексирования блоков нагрузки в группы блоков нагрузки (TUG) различного уровня вплоть до формирования виртуального контейнера верхнего уровня VC-4. В результате присоединения заголовка маршрута VC-4 POH образуется административный блок (AU), к которому подсоединяется секционный заголовок SOH (Section Overhead).

Как видно, процесс загрузки цифрового потока связан с использованием процессов выравнивания (битового стаффинга), активностью указателей, а также с использованием заголовков POH и SOH. Размер контейнера в системе передачи SDH стандартизирован. Его размер несколько больше размера, необходимого для загрузки потока PDH соответствующего уровня иерархии с учетом максимально допустимой вариации скорости загружаемого потока. При загрузке цифрового потока производится процедура выравнивания его скорости методом битового стаффинга, для этого используется часть контейнера.

Таким образом, выделение определенного фрагмента потока (например, канала E1) упрощается, если ввести указатели начала этого фрагмента в структуре инкапсулирующего его фрейма. Использование указателей позволяет гибко компоновать внутреннюю структуру контейнера-носителя. Сохранение указателей в буфере (заголовке фрейма или мультифрейма) и их дополнительная защита кодами с коррекцией ошибок позволяют получить исключительно надежную систему локализации внутренней структуры, передаваемой по сети полезной нагрузки (фрейма, мультифрейма или контейнера).

При разработке модуля STM-1 были использованы два типа битового стаффинга:

- плавающее выравнивание предусматривает не только компенсацию разницы в скоростях загружаемых цифровых потоков, но и ее вариацию. В этом случае полезная нагрузка в контейнере может гибко увеличиваться и уменьшаться. Для обеспечения плавающего выравнивания в нескольких частях контейнера предусматриваются поля переменного стаффинга. Периодически повторяемые индикаторы стаффинга опреде-

ляют, является ли бит в поле переменного стаффинга информационным или битом выравнивания и подлежит уничтожению в процессе выгрузки;

- фиксированное выравнивание предусматривает добавление в состав контейнера дополнительных битов для того, чтобы его размер соответствовал стандартному. В отличие от процесса плавающего выравнивания, где стаффинговые биты идентифицируются индикаторами, в процессе фиксированного выравнивания индикаторы не используются. Место расположения стаффингового поля определено структурой контейнера.

Разработанное ИУЦС позволяет на его базе создавать: транспортные сети структуры PDH с произвольной топологией; транспортные сети структуры SDH с топологией одинарного или двойного кольца либо иерархической топологией; многофункциональные системы каналообразования и мультиплексирования; распределенные сети гибких мультиплексоров; абонентские выносы с функциями распределенных АТС; распределенные системы междугородних коммутаторов и контакт-центров; транспортные сети аудио- и видеотрансляции и конференц-связи; выделенные транспортные сети документальной связи; интегрированные сети пакетной коммутации (TCP/IP), наложенные на сети структуры PDH или SDH; станции коммутации телеграфных каналов связи; абонентские выносы, интегрированные в транспортные сети STM.

Литература

1. Слепов Н.Н. Синхронные цифровые сети SDH. – М: «ЭКО-ТРЕНДЗ», 1999. – 148 с.
2. Ким Л.Т. Синхронная цифровая иерархия // Электросвязь. – 1991. – № 3. – С. 34–37.
3. Тилеке К. Синхронная цифровая иерархия – новый перспективный стандарт передачи информации // Электросвязь. – 1994. – № 10. – С. 17–19.

Статья поступила
15 июня 2006 г.

Янчук Евгений Евгеньевич – генеральный директор ЗАО «РИССА» г. Москва.
Область научных интересов: разработка методов повышения достоверности информации в телекоммуникационных системах, мультисервисные телекоммуникационные системы и сети, устройства цифрового сопряжения, мультиплексирования и коммутации для радиорелейных станций.

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

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

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

Методы информационного согласования в двухкомплексной системе

И.В.Ашарина

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Исследованы условия, при которых возможно достижение взаимного информационного согласования в двухкомплексных вычислительных системах. Приведены алгоритмы взаимного информационного согласования для таких систем.

При построении многомашинных вычислительных систем (МВС) одной из важнейших является задача достижения взаимного информационного согласования (ВИС) [1]. Существует ряд решений этой проблемы [1, 2], основанных на многораундовых обменах сообщениями между ЦВМ с последующим анализом полученных сообщений и вычислением согласованных значений в каждой ЦВМ. Однако разработанные методы применяются для однокompлексных систем.

Данная работа посвящена исследованию возможностей междокомплексного ВИС в двухкомплексных системах.

Комплексом называется группа ЦВМ, выполняющих копии одной и той же задачи. Многокомплексная МВС (МКС) – это отказоустойчивая МВС, в которой разными комплексами одновременно выполняются несколько прикладных задач [3].

Назовем комплексом согласования группу ЦВМ, образующую граф, полносвязный или гомеоморфный полносвязному, и выполняющую задачу ВИС. Под МКС будем подразумевать МВС, каждый комплекс согласования которой выполняет внутрикомплексное ВИС, обменивается полученными результатами с другими комплексами согласования данной системы и вычисляет согласованное значение МВС. Будем считать комплексом-источником данных комплекс согласования, передающий свое согласованное значение другому комплексу согласования, который назовем комплексом-приемником данных. ЦВМ комплекса-приемника данных получают согласованное значение комплекса-источника данных, которое становится согласуемым значением комплекса-приемника.

В рассматриваемой модели примем следующие условия:

- МКС состоит из двух комплексов согласования;
- каждый комплекс выполняет свою собственную задачу и в определенные моменты времени передает свое собственное согласованное значение комплексу-приемнику;
- междокомплексные связи двунаправленные, поэтому любой из комплексов может быть комплексом-источником данных и комплексом-приемником. Будем рассматривать только одно направление;
- каждый из комплексов может содержать неисправные ЦВМ, имеющие «враждебный характер» (византийские неисправности);
- каждая ЦВМ имеет информацию об архитектуре системы.

Анализ условий достижения ВИС в двухкомплексной МВС. Рассмотрим графовую модель двухкомплексной МВС. Будем считать вершиной графа ЦВМ, ребром графа – связь между ЦВМ. Считаем, что каждый из комплексов *A* и *B* является 4-машинным и полносвязным (рис.1).

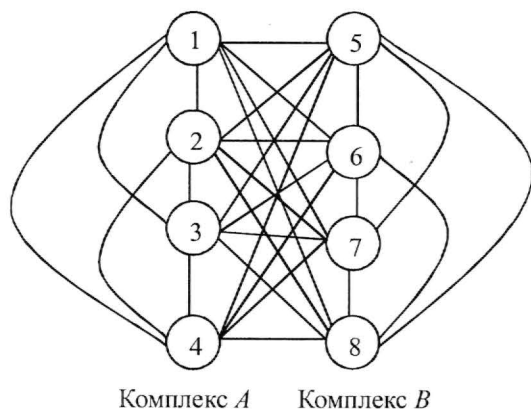


Рис.1. Двухкомплексная система

Значения передаются по двунаправленным каналам связи из комплекса *A* (комплекс-источник) в комплекс *B* (комплекс-приемник). В каждом из комплексов может быть не более m неисправных ЦВМ. В работе [1] показано, что $n \geq 3m + 1$, поэтому для комплексов, изображенных на рис.1, $m = 1$ (здесь n – общее число ЦВМ в комплексе, m – количество неисправных ЦВМ в комплексе).

Основной целью данной работы является достижение ВИС в двухкомплексной системе. Для этого требуется определить конфигурацию системы: необходимое количество межкомплексных связей; расположение межкомплексных связей относительно ЦВМ комплекса.

Предварительным условием достижения ВИС в МКС является следующее: все исправные ЦВМ комплекса-источника в количестве не меньше $n = 3m + 1$ передают одинаковое значение, которое назовем согласованным значением комплекса-источника.

Условия достижения ВИС можно сформулировать следующим образом:

- при межкомплексном обмене все исправные ЦВМ комплекса-источника информации передают одинаковые согласованные значения всех исправных ЦВМ комплекса-источника информации;
- согласованное значение в комплексе-приемнике должно быть равно согласованному значению в комплексе-источнике.

Алгоритм ВИС для двухкомплексной МВС. Сложность алгоритма ВИС зависит от принятой модели неисправностей ЦВМ. Различают «дружественные» и «враждебные» неисправности ЦВМ. При «дружественной» неисправности поведение ЦВМ может быть произвольным, но обязательно одинаковым по отношению к другим взаимодействующим с ней ЦВМ. При «враждебной» неисправности поведение ЦВМ может быть произвольным и неодинаковым по отношению к другим ЦВМ.

Рассматриваемая модель допускает «враждебное» поведение неисправных ЦВМ.

Метод состоит в том, что в процессе ВИС выполняются две фазы согласования: внутрикомплексная и межкомплексная. В результате внутрикомплексной фазы согласования, выполняемой в каждом комплексе по алгоритму ВИС из [1], во всех исправных ЦВМ комплекса формируются одинаковые согласованные значения, соответствующие собственным значениям всех ЦВМ комплекса согласования.

Обобщенный алгоритм ВИС для двухкомплексной системы состоит из следующих шагов.

1. Выполняется обмен сообщениями между ЦВМ, принадлежащими разным комплексам, по каналам связи (межкомплексный обмен (МКО)), в результате которого ЦВМ комплекса-приемника получают согласованное значение (вектор согласованных значений) комплекса-источника.

2. Выполняется алгоритм ВИС в полностью связанном комплексе-приемнике для согласования значений, полученных в результате МКО от комплекса-источника. Для получения согласованного значения в комплексе-приемнике возможно использование одного из алгоритмов (сценариев):

A1. Мажорирование полученных в результате МКО согласованных значений комплекса-источника в каждой ЦВМ комплекса-приемника.

A2. МКО:

- обмен сообщениями внутри одного комплекса (внутрикомплексный обмен (ВКО)), полученными в результате МКО согласованных значений комплекса-источника;

- мажорирование результатов ВКО в каждой ЦВМ комплекса-приемника.

A3. МКО:

- мажорирование полученных в результате МКО согласованных значений;

- ВКО;

- мажорирование полученных в результате ВКО согласуемых значений.

A4. МКО:

- каждая ЦВМ комплекса-приемника формирует вектор значений, полученных от ЦВМ комплекса-источника;

- ВКО;

- мажорирование полученных в результате ВКО согласуемых значений;

- сравнение результатов мажорирования с каждым из полученных элементов;

- при получении несовпадающих значений результатов мажорирования со значениями вектора формируется область подозреваемых неисправных ЦВМ;

- выполняется конъюнкция областей неисправных ЦВМ: преобразования вида $pp = p, pq \vee pq = pq$ [4];

- после выполнения преобразований и получения результирующей области подозреваемых значений удаляем из рассмотрения значения, связанные с ЦВМ, принадлежащими области подозреваемых неисправных ЦВМ;

- если в результате получилось согласованное значение, выполнение алгоритма ВИС завершается, иначе – повторяем МКО и выполнение алгоритма A4. Назовем такую повторную попытку достижения ВИС циклом согласования. Циклы согласования повторяем до тех пор, пока не будет достигнуто ВИС или пока количество циклов согласования не будет удовлетворять критерию окончания процесса идентификации.

Критерий окончания процесса идентификации может определяться одним из двух параметров: временем выполнения или числом циклов согласования.

Рассмотрим условия применения каждого из приведенных алгоритмов.

Положение 1. Если к каждой ЦВМ комплекса-приемника подходит не менее чем $2m_{\text{ист}} + 1$ межкомплексная связь (где $m_{\text{ист}}$ – возможное количество неисправностей в комплексе-источнике), то возможно достижение ВИС по алгоритму A1.

Доказательство. Предположим обратное, т.е. будем считать, что для такого алгоритма согласования достаточно количества межкомплексных связей k меньше чем $2m_{\text{ист}} + 1$.

При $k \leq 2m_{\text{ист}}$ к исправной ЦВМ комплекса-приемника подходит не более чем m связей, передающих правильное значение, и m связей, передающих неправильное (одинаковое) значение. При $k = 2m_{\text{ист}}$ происходит мажорирование четного числа переменных, из которых половина имеет одно значение, другая половина – другое, что дает в результате неопределенное значение. При $k < 2m_{\text{ист}}$ к исправной ЦВМ комплекса-

приемника подходит меньше чем m связей, передающих правильное значение, и m связей, передающих неправильное значение. В этом случае в качестве результата мажорирования выступает значение, переданное неисправными ЦВМ. Следовательно, достижение ВИС невозможно.

Таким образом, доказано, что к каждой ЦВМ комплекса-приемника должна подходить не менее чем $2m_{\text{ист}} + 1$ межкомплексная связь.

Положение 2. Если в каждой ЦВМ комплекса-приемника находится $N_{\text{ист}}$ копий согласуемых значений от источника и $N_{\text{пр}}$ копий согласуемых значений от приемника, полученных по непересекающимся маршрутам, то их количество должно быть $N_{\text{ист}} + N_{\text{пр}} \geq 2(m_{\text{ист}} + m_{\text{пр}}) + 1$ (где $m_{\text{пр}}$ – возможное количество неисправностей в комплексе-приемнике), чтобы согласование происходило по алгоритму А2.

Доказательство. Пути должны быть непересекающимися, так как в противном случае невозможно обеспечить достоверность данных, если несколько путей будут проходить через неисправную ЦВМ. Докажем теперь, что количество копий N должно быть не меньше чем $2(m_{\text{ист}} + m_{\text{пр}}) + 1$. Предположим обратное: $N \leq 2(m_{\text{ист}} + m_{\text{пр}})$. Тогда в исправной ЦВМ комплекса-приемника окажется не более чем $(m_{\text{ист}} + m_{\text{пр}})$ копий от исправных ЦВМ и $(m_{\text{ист}} + m_{\text{пр}})$ копий от неисправных. При $N = 2(m_{\text{ист}} + m_{\text{пр}})$ происходит мажорирование четного числа переменных, из которых половина имеет одно значение, другая половина – другое, что дает в результате неопределенное значение. При $N < 2(m_{\text{ист}} + m_{\text{пр}})$ к исправной ЦВМ комплекса-приемника подходит меньше связей, передающих правильное значение, чем передающих неправильное значение. В этом случае в качестве результата мажорирования выступает значение, переданное неисправными ЦВМ. Следовательно, достижение ВИС невозможно.

Таким образом, доказано, что число копий согласуемого значения в исправной ЦВМ должно быть не менее чем $2(m_{\text{ист}} + m_{\text{пр}}) + 1$.

Положение 3. Если не менее чем к $2m_{\text{пр}} + 1$ ЦВМ комплекса-приемника подходит не менее чем $2m_{\text{ист}} + 1$ межкомплексная связь, то возможно достижение ВИС по алгоритму А3.

Доказательство. В соответствии с Положением 1 можно считать доказанным, что два первых шага А3 – МКО и мажорирование полученных в результате МКО согласованных значений – позволяют получить согласованное значение в тех ЦВМ комплекса-приемника, к которым подходит не менее чем $2m_{\text{ист}} + 1$ межкомплексная связь. Докажем, что количество k таких связей должно быть не менее чем $2m_{\text{пр}} + 1$. Предположим обратное.

При $k \leq 2m_{\text{пр}}$ к исправной ЦВМ комплекса-приемника подходит не более чем m связей, передающих правильное значение, и m связей, передающих неправильное (однаковое) значение. При $k = 2m_{\text{пр}}$ происходит мажорирование четного числа переменных, из которых половина имеет одно значение, другая половина – другое, что дает в результате неопределенное значение. При $k < 2m_{\text{пр}}$ к исправной ЦВМ комплекса-приемника подходит меньше чем m связей, передающих правильное значение, и m связей, передающих неправильное значение. В этом случае в качестве результата мажорирования выступает значение, переданное неисправными ЦВМ. Следовательно, достижение ВИС невозможно.

Таким образом доказано, что количество ЦВМ комплекса-приемника, к которым подходит не менее чем $2m_{\text{ист}} + 1$ межкомплексная связь, должно быть не менее чем $2m_{\text{пр}} + 1$.

Положение 4. Алгоритм А4 может быть использован для достижения ВИС в двух-комплексной МВС, если не менее чем к $2(m_{\text{ист}} + m_{\text{пр}}) + 1$ ЦВМ подходит по крайней мере одна независимая межкомплексная связь.

Доказательство аналогично доказательству Положений 1, 2, 3.

Рассмотрим примеры, иллюстрирующие работу приведенных алгоритмов.

Пример 1. Работа алгоритма А1 (рис.2,а).

Считаем неисправной ЦВМ № 4 комплекса А и ЦВМ № 8 комплекса В. Исправные ЦВМ передают значение a , неисправные – значение b . В результате мажорирования результатов МКО в каждой исправной ЦВМ получено согласованное значение a .

Пример 2. Работа алгоритма А2 (рис.2,б).

Считаем неисправной ЦВМ № 4 комплекса А и ЦВМ № 8 комплекса В. Исправные ЦВМ передают значение a , неисправные – значение b .

Независимые пути передачи данных из комплекса А в ЦВМ комплекса В – следующие:

1–8–6; 2–9–6; 3–7–6; 4–10–6; 5–6;
1–8–7; 2–9–7; 3–7; 4–10–7; 5–6–7;
1–8; 2–9–8; 3–7–8; 4–10–8; 5–6–8;
1–8–9; 2–9; 3–7–9; 4–10–9; 5–6–9;
1–8–10; 2–9–10; 3–7–10; 4–10; 5–6–10.

Пример 3. Работа алгоритма А3 (рис.2,в).

Считаем неисправной ЦВМ № 4 комплекса А и ЦВМ № 8 комплекса В. Исправные ЦВМ передают значение a , неисправные – значение b .

Межкомплексный обмен с последующим мажорированием не позволяет получить согласо-

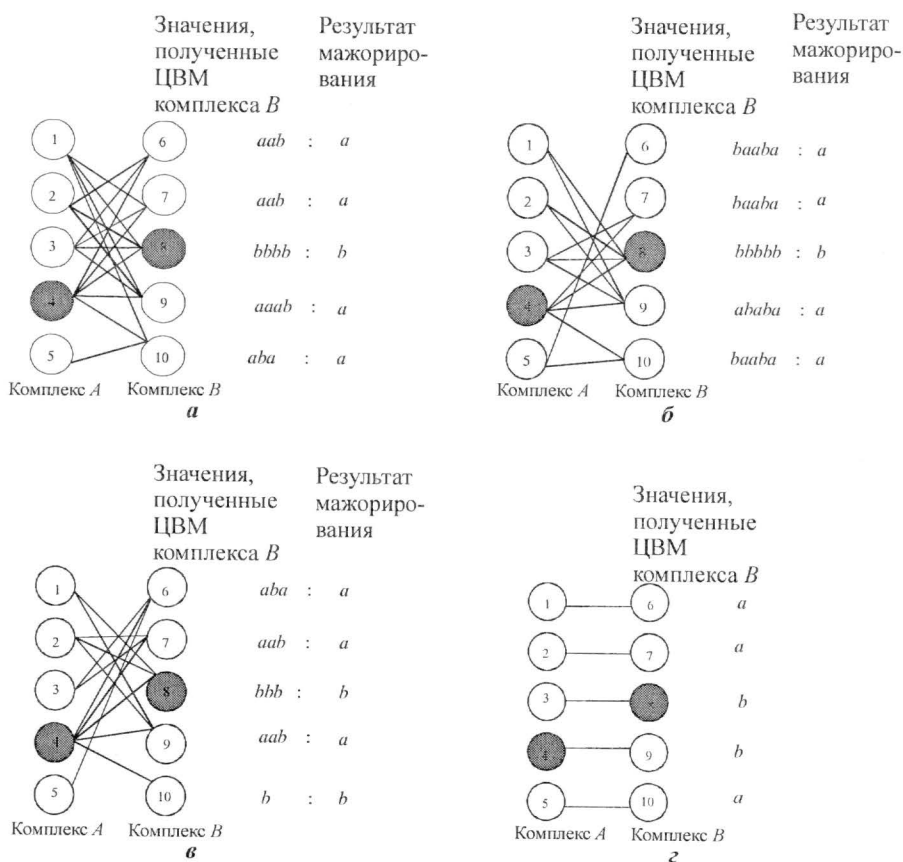


Рис.2. Иллюстрация работы алгоритма: а – А1; б – А2; в – А3; г – А4

ванное значение равно a в исправной ЦВМ № 10. Для получения согласованного значения производим ВКО результатами мажорирования. После этого достигается согласование во всех исправных ЦВМ комплекса.

Пример 4. Работа алгоритма А4 (рис.2,з).

Считаем неисправной ЦВМ № 4 комплекса А и ЦВМ № 8 комплекса В. Исправные ЦВМ передают значение a , неисправные – значение b .

При ВКО получаем вектор, содержащий значения a и значения b . Поскольку ЦВМ «не знают», какое из значений правильное, область подозреваемых значений строится дважды: в предположении, что правильным является значение a , и в предположении, что правильным является значение b :

a – правильное, тогда область подозреваемых ЦВМ будет $(3V8)(4V9) = 3 \cdot 9V4 \cdot 8$

b – правильное, тогда область подозреваемых ЦВМ будет $(1V6)(2V7)(5V10) = \{\emptyset\}$ – по результатам преобразований.

Удаление значений, связанных с ЦВМ № 3, 4, 8, 9, приводит к получению согласованного значения, равного a .

Разработанные алгоритмы позволяют достичь взаимного информационного согласования в двухкомплексной МВС при условии отсутствия некоторого числа межкамплексных связей.

Литература

1. Pease M., Shostak R. Lamport L. Reaching agreement in presence of faults // J. ACM. – 1980. – Vol. 27, N 2. – P. 228–234.
2. Мамедли Э.М., Самедов Р.Я., Соболев Н.А. Метод локализации «дружественных» неисправностей // Автоматика и телемеханика. – 1992. – № 5. – С. 126–138.
3. Генинсон Б.А., Панкова Л.А., Трахтенгерц Э.А. Отказоустойчивые методы обеспечения взаимной информационной согласованности в распределенных вычислительных системах // Автоматика и телемеханика. – 1989. – № 5. – С. 3–18.
4. Лобанов А.В. Взаимное информационное согласование с обнаружением и идентификацией враждебных неисправностей в неполносвязных многомашинных вычислительных системах // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 6. – С. 175–186.

Статья поступила
27 февраля 2006 г.

Ашарина Ирина Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и программного обеспечения вычислительных систем МИЭТ.
Область научных интересов: программирование, вопросы надежности и отказоустойчивости в распределенных вычислительных системах.

ПРОБЛЕМЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 378.225

Центры формирования компетенций как механизм реализации компетентностного подхода в подготовке и переподготовке инженерных кадров для инновационной экономики

Ю.А. Чаплыгин, А.С. Пospelов, С.А. Гаврилов, А.А. Прокофьев

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

Приведен анализ задач, решение которых должно обеспечить успешную реализацию инновационной образовательной программы МИЭТ, основанной на внедрении компетентностного подхода в подготовке и переподготовке кадров при модульной организации учебного процесса. В качестве механизма реализации этого подхода обосновывается необходимость создания в структуре университета центров формирования компетенций, главной задачей которых является реализация инновационного модуля профессиональной инженерной подготовки.

Решение поставленной перед высшими учебными заведениями задачи обеспечения качества подготовки специалистов [1–3] требует создания непосредственных связей между целями реальной инновационной экономики со структурой и содержанием учебно-научного процесса в вузах. Инновационный рынок постоянно изменяется: одни направления развиваются, потребности других уменьшаются. Динамика изменений может быть более интенсивной по сравнению с существующим циклом обучения.

В связи с этим необходимо сокращать срок целевой подготовки специалистов к профессиональной деятельности при сохранении качества этой подготовки. Современное инженерное образование в области высоких технологий можно обеспечить на качественном уровне только при условии создания гибкой и динамичной образовательной среды. Условия функционирования этой среды должны быть продиктованы потребностями рынка, которые оцениваются на основе общемировых, национальных и региональных направлений развития.

Однако сложившаяся система подготовки специалистов в вузах зачастую не может в полной мере обеспечивать динамично изменяющиеся потребности инновационного сектора экономики. С одной стороны, это связано с тем, что реальный цикл подготовки специалиста в конкретной области, определяемый структурой той или иной основной образовательной программы, составляет не менее 5 лет. С другой стороны, учитывая динамику изменений потребностей рынка, особенно в сфере высоких технологий, чрезмерно длительный (5-летний) цикл подготовки может приводить к перепроизводству специалистов в одних отраслях и недостатку в других. Таким образом, неизбежно возникает проблема поиска путей сокращения цикла подготовки при обязательном сохранении и повышении качества обучения.

© Ю.А. Чаплыгин, А.С. Пospelов, С.А. Гаврилов, А.А. Прокофьев, 2006

Решение поставленной задачи становится возможным на основе разработки и реализации инновационной модели модульной системы высшего профессионального образования в области электроники с учетом компетентностного подхода путем многоуровневого построения учебно-научного процесса в вузе. Это подразумевает создание структуры и организационно-методического обеспечения трехуровневой системы инженерной подготовки в сфере высоких технологий по основным образовательным программам, включающей в себя три модуля.

1. Модуль фундаментальной инженерной подготовки (блок естественно-научных и гуманитарных дисциплин, который обеспечивает фундаментальную базовую подготовку специалистов независимо от будущей узкой специализации).

2. Модуль общепрофессиональной подготовки (блок обеспечивающих профессиональную подготовку дисциплин, содержащий в основном дисциплины общепрофессионального цикла).

3. Модуль специальной инновационной подготовки, предусматривающий создание инфраструктуры Центров формирования компетенций (ЦФК) как механизма реализации компетентностного подхода подготовки специалистов.

Первые два модуля представляют, по существу, сердцевину (ядро) инженерного образования, которое может и должно подвергаться стандартизации и унификации. Для современного выпускника ориентация на непрерывное (продолженное) обучение является более важно, чем раз и навсегда завершенное, узкоспециализированное. Особенно это актуально в стремительно развивающихся и динамически изменяющихся отраслях науки и производства. Срок адаптации выпускника на предприятии после окончания обучения должен быть максимально сокращен за счет правильного построения процесса специализации. Этой цели должен служить заключительный модуль специальной инновационной подготовки. Он содержит набор специальных инновационных дисциплин и строится на основе потребностей рынка при тесном сотрудничестве с ведущими производителями в области высоких технологий.

При таком построении длительность инновационного цикла составит не более 2-х лет, что значительно повышает возможность гибкого реагирования на динамично меняющийся спрос на направление и уровень подготовки.

Решение данной задачи стало возможным благодаря победе Московского государственного института электронной техники (технического университета) в конкурсе среди вузов, внедряющих инновационные образовательные программы, в рамках приоритетного национального проекта «Образование». Одной из отличительных особенностей механизма реализации программы стало создание на базе МИЭТ 7 центров формирования компетенций. Научный и педагогический потенциал, созданный за 40 лет существования вуза, позволил сформировать ядро реализации программных мероприятий в области подготовки инженерных и научных кадров по таким приоритетным направлениям науки и техники, как «Индустрия наносистем и материалов», «Информационно-телекоммуникационные системы», «Живые системы».

Выбор данных направлений развития учебно-методической и приборной базы университета связан с тем, что МИЭТ является одним из ведущих университетов России в области электроники и информационных технологий. В официальном рейтинге Минобрнауки последние 5 лет МИЭТ входит в десятку лучших среди 164 технических и технологических вузов страны.

Поставленные в рамках реализации Проекта цели и задачи тесно переплетены с миссией вуза, развивающегося в рамках стратегических приоритетов развития Российской Федерации, среди которых важная роль отводится развитию образования, науки и

высоких технологий как ключевых инструментов построения инновационной экономики и современного постиндустриального общества. Реализация этих приоритетов требует развития национальной инновационной системы и модернизации системы образования в направлении повышения уровня интеграции учебного процесса с научной и инновационной деятельностью для подготовки профессиональных специалистов в области высоких технологий. В свою очередь, эта задача неразрывно связана с необходимостью развития университетских комплексов, сохранивших высокий потенциал и способных занять в своих областях ведущие позиции в образовании, науке и инновационной деятельности. Это определяет миссию и стратегическую перспективу развития МИЭТ как источника образовательных и научно-инновационных компетенций в области электроники, определяющей практически все сферы жизни современного общества.

В 2005 г. принято решение о создании на территории Зеленоградского административного округа г. Москвы Особой технико-внедренческой зоны – ОТВЗ «Зеленоград», деятельность резидентов которой будет связана с развитием электроники, микроэлектроники, нанотехнологий, информационно-телекоммуникационных технологий, микросистемной техники и т.п. Один из двух участков ОТВЗ создается на территории МИЭТ. В этих условиях задача дальнейшего совершенствования и развития образовательной и научно-инновационной деятельности в университетском комплексе МИЭТ приобретает особую значимость. От ее решения во многом будет зависеть успех мероприятий по созданию Особой технико-внедренческой зоны.

Создание ОТВЗ диктует необходимость в масштабной подготовке высокопрофессиональных специалистов и расширении спектра проводимых научно-исследовательских работ для освоения в рамках технико-внедренческой зоны широкой номенклатуры новой конкурентоспособной высокотехнологичной продукции.

Таким образом, как на федеральном, так и на региональном уровне МИЭТ должен обеспечить непрерывную многоуровневую профессиональную подготовку специалистов мирового уровня и научно-инновационную деятельность в сфере высоких технологий.

При планировании работ по реализации инновационной образовательной программы принято решение о создании 7 центров формирования компетенций, объединивших в своем составе ведущие научные коллективы университета. По своей структуре ЦФК – это объединение:

- одной или нескольких кафедр, осуществляющих обучение по одному или нескольким направлениям подготовки специалистов, бакалавров и магистров, а также родственным программам дополнительной подготовки и переподготовки кадров;

- одной или нескольких учебно-научных лабораторий, в которых на базе современного оборудования реализуется практикум по специальным инновационным дисциплинам и проводятся научные исследования студентов старших курсов, магистрантов и аспирантов;

- других подразделений учебно-научно-инновационного комплекса университета, способствующих процессу формирования общепрофессиональных и специальных компетенций у обучающихся.

ЦФК формируется и развивается как специализированное структурное образование в составе единого учебного, научно-исследовательского и инновационного комплекса МИЭТ, обладающее уникальными возможностями для подготовки и повышения квалификации специалистов всех уровней. Учебно-научная деятельность ЦФК осуществляется в тесном сотрудничестве со стратегическими партнерами университета – российскими и зарубежными производственными объединениями и научными

организациями, на основе долгосрочных совместных программ подготовки и переподготовки кадров, в формах базовых кафедр, учебно-научных центров, организаций практик и дипломного проектирования, чтения специальных курсов.

Приоритетными направлениями деятельности ЦФК являются:

- реализация учебного процесса подготовки бакалавров, специалистов и магистров по основным образовательным программам;
- разработка и реализация программ дополнительной подготовки и переподготовки кадров;
- научно-исследовательская и инновационная деятельность студентов старших курсов, магистрантов и аспирантов как основа формирования их профессиональных компетенций;
- разработка учебно-методических материалов по основным и дополнительным программам обучения;
- внедрение новых, современных форм и методов в учебном процессе с учетом потребностей и заказов работодателей;
- внедрение в учебный процесс перспективных методов управления качеством на основе компетентностного подхода и с учетом трудоемкости реализации;
- постоянный мониторинг потребностей электронной промышленности г. Зеленограда, ОТВЗ «Зеленоград» и России в целом в высококвалифицированных специалистах по реализуемым направлениям и программам инженерной подготовки.

В рамках обозначенных приоритетных направлений деятельности ЦФК университет проводит оптимизацию учебных курсов как в инновационном цикле, так и в блоке общепрофессиональных дисциплин. Минимальные изменения в этом случае осуществляются в модуле фундаментальной инженерной подготовки.

Одним из путей перехода на качественно более высокий уровень построения процесса подготовки специалистов в высшем учебном заведении является развитие тесных партнерских отношений между сферами образования, науки и инновационной (производственной) деятельности. Ядром реализации этой схемы могут служить 7 центров формирования компетенций, созданных на базе МИЭТ: **нанотехнологии в электронике; электроника биомедицинских и экологических систем; математическое моделирование и проектирование информационно-управляющих систем; перспективные телекоммуникационные технологии; волноводная оптика и оптоэлектроника; проектирование электронной компонентной базы и систем на кристалле; микросистемная техника и технология электронных устройств.**

Главной задачей, которая поставлена перед каждым ЦФК, является интеграция университетского комплекса МИЭТ в сферу реальной экономической деятельности в масштабах Российской электронной индустрии. Ориентирование учебно-научного процесса в вузах на инновационные процессы в отрасли и социально-экономические потребности региона направлено на активизацию и развитие научных исследований и инновационной деятельности, повышение их результативности и эффективности.

В последние годы в МИЭТ сложились благоприятные предпосылки и условия реализации нового подхода к организации подготовки специалистов в области электроники. Имеется развитая сеть партнеров, которые развивают инновационную и научную деятельность в сфере электроники. Среди них можно выделить ГНЦ, институты РАН, ряд частных компаний. На партнерской основе созданы ЦКП, учебные центры, базовые кафедры, которые обеспечивают как производственную практику, так и высокий уровень подготовки специалиста в вопросах научных исследований и реального производства. В то же время в университете сложились передовые научные коллективы, осуще-

ствляющие исследования и разработки в следующих областях: «Волноводная оптика и оптоэлектроника», руководитель д.ф.-м.н., проф. Коркишко Ю.Н.; «Микросистемная техника и технология электронных устройств», руководитель д.т.н., проф. Тимошенков С.П.; «Проектирование электронной компонентной базы и систем на кристалле», руководитель д.т.н., проф. Путря М.Г.; «Нанотехнологии в электронике», руководитель д.ф.-м.н., проф. Горбачев А.А.; «Перспективные телекоммуникационные технологии», руководитель д.т.н., проф. Барин В.В.; «Математическое моделирование и проектирование информационно-управляющих систем», руководитель д.т.н., проф. Бархоткин В.А.; «Электроника биомедицинских и экологических систем», руководитель д.ф.-м.н., проф. Селищев С.В.

Лидирующие позиции перечисленных научно-педагогических коллективов стали основой для объединения под их началом других кафедр и научно-исследовательских лабораторий, осуществляющих подготовку специалистов и проведение научных исследований в родственных областях. Таким образом, сложилась схема межкафедрального, а во многих случаях и межкафедетского взаимодействия в области инновационной подготовки по приоритетным направлениям.

Анализ, проведенный на основе данных о динамике развития секторов рынка в области электроники, потребностях производителей и распределении выпускников на предприятия региона, позволил определить следующие основные направления подготовки: «Нанотехнология в электронике», «Микроэлектроника и полупроводниковые приборы», «Микроэлектроника и твердотельная электроника», «Микросистемная техника», «Системы автоматизированного проектирования», «Биотехнические и медицинские аппараты и системы», «Инженерная защита окружающей среды», «Защищенные системы связи», «Многоканальные телекоммуникационные системы», «Комплексная защита объектов информатизации», «Радиоэлектронные системы», «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети», «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем», «Прикладная математика», «Электронное машиностроение», «Проектирование и технология электронно-вычислительных средств», «Управление и информатика в технических системах».

Предоставленные на разработку и внедрение инновационной образовательной программы средства в 2006–2007 гг. позволят провести коренное переоснащение учебно-научных лабораторий МИЭТ. Это открывает возможность в реализации на передовом уровне учебно-исследовательской деятельности студентов, аспирантов и молодых ученых в таких перспективных направлениях, как:

- проектирование электронной компонентной базы и систем на кристалле;
- разработка многопроцессорных и телекоммуникационных SOC;
- создание микросхем кремниевых магниточувствительных структур, 16-разрядного RISC микроконвертора, цифровых устройств кодирования информации;
- МЭМС, МОЭМС, сенсоры, микроакселерометры, микрогирометры, датчики давления, микрзеркала, системы ориентации, навигации, стабилизации, телекоммуникации и т.д.;
- разработка и создание сверхчувствительных газовых сенсоров на основе углеродных нанотрубок, сверхбыстродействующих элементов и устройств на основе полупроводниковых гетероструктур для систем широкополосной радиосвязи, измерительной техники и радиолокации;
- разработка, адаптация и подготовка производства базовых технологий в области волоконно-оптических, интегрально-оптических и лазерных технологий;

- разработка программно-аппаратных комплексов для управления и связи с высокоподвижными объектами, систем связи новых поколений, сенсорных сетей;
- создание авиационных информационно-управляющих систем ИУС, дистанционно управляемых аппаратов, систем безопасности, радиолокационных систем с интеллектуальными антеннами, программного обеспечения ИУС, включая САПР ИУС;
- разработка систем биомедицинской визуализации, средств диагностики и терапии сердечно-сосудистых заболеваний, головного мозга, рака молочной железы, диабета, генетически обусловленных заболеваний, систем контроля окружающей среды.

В заключение отметим, что обеспечение качества подготовки кадров в перечисленных направлениях специализаций оказывается наиболее эффективным при реализации предложенной схемы. Рассмотренная система построения учебного процесса обеспечивает реагирование на внешние условия в течение не более 2 лет за счет универсализации нижних уровней.

Выделим ряд новых функциональных возможностей созданной схемы по сравнению с существующим построением процесса подготовки профессиональных кадров:

- динамичность, т.е. возможность в короткий временной интервал обеспечивать оптимальные показатели выпуска специалистов в соответствии с требованиями отрасли;
- университет станет научно-исследовательской и экспериментальной базой для партнеров-производителей. Университет имеет уникальные средства исследований, оснащенные современным оборудованием, что привлечет к партнерству не только научных работников, но и сформирует научно-исследовательские и опытно-конструкторские заказы производителей. Это обеспечит уже на стадии обучения и производственной практики соответствие решаемых студентами и аспирантами задач, сформулированных потребностями отрасли;
- при условии создания межвузовских партнерских объединений, реализующих учебно-научно-инновационный процесс по единой схеме, открывается реальная возможность обеспечения мобильности студентов и преподавателей за счет широкого применения современных средств информационных технологий;
- наличие в регионе лидеров в области высоких технологий обеспечивает доступ студентов к современным средствам производства и к участию в реальной производственной деятельности.

Предлагаемая структура организации процесса подготовки инженерных кадров в сфере высоких технологий позволит снизить срок адаптации специалиста за счет того, что в процессе обучения студент имеет возможность использования оборудования, стандартов, документации, решить проблемы, с которыми он столкнется в качестве инженера, т.е. на третьем уровне обучения студент будет иметь максимально полное представление о месте своей будущей работы и обладать необходимыми практически навыками.

Динамичная структура процесса подготовки кадров будет стимулировать развитие методов и методик преподавания современных наук, а также условия для их освоения преподавателями, в том числе за счет открывающейся возможности работы преподавателей в инновационном секторе.

Переход на новый уровень развития университетского комплекса МИЭТ обеспечит превращение его в центр роста инновационной экономики России и источника кадровых, научно-образовательных, инновационных и иных компетенций в масштабах Российской электронной индустрии.

Литература

1. Концепция модернизации российского образования на период до 2010 года // Приказ Минобробразования России от 11.02.2002 № 393.
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 14 февраля 2006 г. № 89 «О мерах государственной поддержки образовательных учреждений, внедряющих инновационные образовательные программы» // Российская газета. – 2006. – № 37. – 22 февраля.
3. Постановление Правительства Российской Федерации от 21 декабря 2005 г. № 779.

Статья поступила
21 ноября 2006 г.

Чаплыгин Юрий Александрович – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, ректор МИЭТ. *Область научных интересов:* физика и технология интегральных микросхем, сенсоров и микросистемной техники, нанотехнологии.

Поспелов Алексей Сергеевич – доктор физико-математических наук, профессор, проректор МИЭТ по учебной работе. *Область научных интересов:* применение теории приближений и оригинальных разложений по мультипликативным ортонормированным системам в задачах цифровой обработки изображений.

Гаврилов Сергей Александрович – доктор технических наук, заведующий кафедрой материаловедения и физической химии. *Область научных интересов:* пористые полупроводники и диэлектрики, электрохимические процессы в технологии нанoeлектроники.

Прокофьев Александр Александрович – доктор педагогических наук, доцент, профессор кафедры высшей математики №1 МИЭТ. *Область научных интересов:* разноразмерные и вариативные модели математического образования в средней и высшей школе.

**D 2
S O
P O
A 7**

**9-я Международная Конференция и Выставка
ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ
28-30 марта 2007 г., Москва, Россия
The 9th International Conference and Exhibition
DIGITAL SIGNAL PROCESSING AND ITS APPLICATIONS**

ОРГАНИЗАТОРЫ: Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова; IEEE Signal Processing Society; Российская секция IEEE; Институт радиотехники и электроники РАН; Институт проблем управления РАН; Институт проблем передачи информации РАН; Московский научно-исследовательский телевизионный институт (ЗАО МНИТИ); Компания AUTEX Ltd. (АВТЭКС).

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТЫ КОНФЕРЕНЦИИ: Теория сигналов и систем; Теория и методы ЦОС; Цифровая обработка многомерных сигналов; Цифровая обработка речевых и звуковых сигналов; Цифровая обработка изображений; ЦОС в системах телекоммуникаций; ЦОС в радиотехнических системах; ЦОС в системах управления и робототехники; Цифровая обработка измерительной информации; Нейрокомпьютерная обработка сигналов и изображений; Цифровое телевидение; Цифровое радиовещание; ЦОС в системах защиты информации; Проектирование и техническая реализация систем ЦОС; ЦОС в открытых системах; Проблемы подготовки специалистов в области ЦОС.

АДРЕС ПРОГРАММНОГО КОМИТЕТА: Российское НТОРЭС им. А.С. Попова, Рождественка, 6/9/20, стр. 1, Москва, 107031; Тел. (495)621-1639 (Мусянков Михаил Иванович), 621-0610, 621-7108; Факс: (495)621-1639; E-mail: nto.popov@mtu-net.ru; tor@rgta.ryazan.ru; <http://www.dsps.ru> и www.rntores.ru (раздел конференции)

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 004.932:621.391

Алгоритм сжатия изображений на основе контекстного скалярно-векторного квантования в области дискретного вейвлет-преобразования

С.В. Умняшкин, Д.М. Коплович, И.В. Черкасов, А.А. Александров

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Векторное квантование (ВК) для компрессии изображений в области дискретного вейвлет-преобразования (ДВП) используется с начала 90-х годов прошлого века [1–3]. При ВК задается некоторое правило Q , по которому каждому вектору \mathbf{x} исходного пространства \mathbf{R}^N ставится в соответствие некоторый кодовый вектор \mathbf{c} из того же пространства. Конечное множество из всех m возможных значений кодовых векторов $\mathbf{C} = \{\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_m\}$ называется кодовой книгой. Передаче и хранению вместо исходного вектора \mathbf{x} подвергается индекс j вектора $\mathbf{c}_j = Q(\mathbf{x})$.

В настоящей работе ВК с малым объемом кодовой книги применяется для сжатия изображений в области ДВП. Для этого использовано 5-уровневое биортогональное ДВП 9/7 [4], выполненное над полутоновым изображением размерности 512×512 пикселей. Коэффициенты 0-го саббэнда (рис.1) подвергаются двумерной дифференциальной импульсно-кодовой модуляции и арифметическому кодированию. Саббэнды с номерами 1–6 кодируются с использованием контекстного скалярного квантования (КСК), схема которого была заимствована из работы [6]. Каждый из саббэндов 7–15 разбивается на 1024 квадратных блока, а затем кодируется с помощью либо контекстного ВК (КВК), либо КСК. Метод кодирования выбирается для каждого блока отдельно по критерию минимума RD-функции Лагранжа.

Таким образом, сначала при помощи алгоритма, описанного в [5], для саббэндов с номерами 7–15 по тестовым изображениям формируются исходные кодовые книги. Затем саббэнды последовательно обрабатываются по уровням ДВП – от низких частот к высоким, т.е. коэффициенты-«родители» обрабатываются перед «потомками».

При обработке очередного вектора y_k по уже закодированным векторам-блокам вычисляется величина

$$E_{\Sigma}^k = \left[\sum_{i=1}^3 e_i^k w_i^k + \sum_{i=1}^9 E_i^k W_i^k \right] \left[\sum_{i=1}^3 w_i^k + \sum_{i=1}^9 W_i^k \right]^{-1},$$

где e_i^k – квадрат евклидовой нормы соседнего с y_k вектора, w_i^k – его весовой коэффициент; E_i^k и W_i^k – квадрат евклидовой нормы и вес вектора из «родительского» саббэнда соответственно. На рис.2 показано расположение векторов-блоков и их веса для вычисления величины E_{Σ}^k . Контекстная кодовая книга $\tilde{\mathbf{C}} = \{\mathbf{c} \in \mathbf{C} \mid \|\mathbf{c}\|_E^2 \in [E_{\Sigma}^k - \Delta; E_{\Sigma}^k + \Delta]\}$ формируется в процессе обработки из векторов общей кодовой книги \mathbf{C} , где параметр Δ носит эмпирический характер.

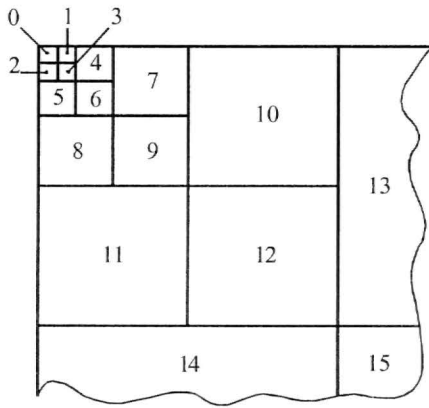


Рис.1. Нумерация саббэндов 5-уровневого ДВП

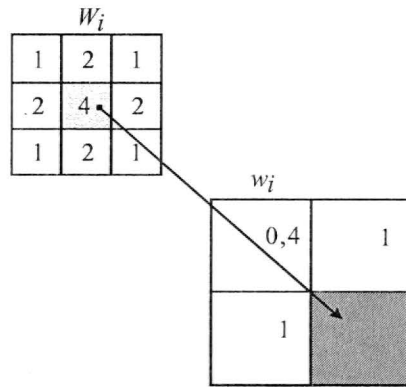


Рис.2. Схема вычисления E_{Σ}^k для k -го вектор-блока (помечен темно-серым цветом). Родительский блок помечен светло-серым цветом

Опишем алгоритм кодирования саббэндов с номерами $i = 7, \dots, 15$, каждый из которых содержит по 1024 блока, просматриваемых слева направо, сверху вниз. Для каждого блока \mathbf{y}_k^i ($k = 0, \dots, 1023$) вычисляется функция Лагранжа, связанная с КСК:

$$J_k^{SQ} = \sum_{y_m \in \mathbf{y}_k^i} (y_m - \hat{y}_m)^2 - \lambda \left(\sum_{y_m \in \mathbf{y}_k^i} \log_2 v(\hat{y}_m) + \log_2 v_{SQ} \right),$$

где \hat{y}_m – проквантованное значение компоненты $y_m \in \mathbf{y}_k^i$, $v(\hat{y}_m)$ – оцениваемая по накопленной статистике частота появления значения \hat{y}_m в контекстно выбранной модели скалярного кодирования (правило выбора – см. [6]), а v_{SQ} – частота использования скалярного метода кодирования блоков в данном саббэнде. Кроме того, вычисляется функция Лагранжа, связанная с КВК:

$$J_k^{VQ} = \min_{\mathbf{c}_j^i \in \tilde{C}_i} \left(\left\| \mathbf{y}_k^i - \mathbf{c}_j^i \right\|_E^2 - \lambda \left(\log_2 \frac{v(\mathbf{c}_j^i)}{\sum_{\mathbf{c}_l^i \in \tilde{C}_i} v(\mathbf{c}_l^i)} + \log_2 v_{VQ} \right) \right),$$

где $v(\mathbf{c}_n^i)$ – оцениваемая по накопленной статистике частота появления кодового вектора \mathbf{c}_n^i в модели кодирования индексов i -й кодовой книги, а v_{VQ} – частота использования векторного метода кодирования блоков в данном саббэнде, $v_{VQ} + v_{SQ} = 1$. (Параметр λ представляет собой величину, определяющую баланс между степенью сжатия данных и уровнем внесенной при кодировании ошибки, и должен выбираться таким же, что и при первоначальном построении кодовых книг с использованием алгоритма [5].) Если $J_k^{SQ} < J_k^{VQ}$, то производится скалярное кодирование k -го блока, и вектор из скалярно проквантованных компонент добавляется в кодовую книгу C_i (если достигнут максимальный объем кодовой книги, то перед этим из нее удаляется кодовый вектор, который встречался реже остальных).

В результате применения описанной процедуры для обработки ряда широко распространенных тестовых полутоновых изображений были получены результаты, приведенные в таблице, где ошибка восстановления изображения оценивается по величине СКО (MSE) через отношение пикового значения сигнала к шуму (ошибке), $\text{PSNR} = 10 \lg \frac{255^2}{\text{MSE}}$ [дБ], а степень сжатия данных выражена через битовые затраты в пересчете на один пиксел изображения (bpp).

Величина PSNR (в дБ), полученная при сжатии тестовых изображений

bpp	Lena	Barbara	Goldhill	Baboon
0,250	34,02	27,97	30,50	23,30
0,500	37,04	31,54	33,10	25,76
0,750	38,72	34,24	34,79	27,61
1,000	39,97	36,35	36,52	29,28

Формируемые контекстно кодовые книги имеют небольшой объем (обычно они содержат лишь несколько векторов), поэтому предложенный алгоритм является простым и вычислительно эффективным. Полученные характеристики предлагаемого алгоритма компрессии изображения, несмотря на его простоту, показывают результаты, аналогичные методу JPEG 2000. Дальнейшее направление исследований – в создании метода компрессии изображений, объединяющего описанный подход с «подрезанием ветвей» вейвлет-коэффициентов [6] и более эффективно использующего контекстное скалярное квантование.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МД-3452.2005.9.

Литература

1. Antonini M., Barlaud M., Mathieu P., Daubechies I. Image coding using wavelet transform // IEEE Trans. Image Processing. – 1992. – Vol. 1, April. – P. 205–220.
2. Cosman P., Gray R.M., Vetterli M. Vector quantization of image subbands: A survey // IEEE Trans. Image Proc. – 1996. – Vol. 5, February. – P. 202–225.
3. Gu Q., Budge S.E. Rate-distortion adaptive vector quantization for wavelet image coding // Proc. ICASSP'00. – June 2000. – P. 1903–1906.
4. Cohen A., Daubechies I., Feauveau J.-C. Biorthogonal bases of compactly supported wavelets // Comm. Pure and Appl. Math. – 1992. – Vol. 45. – P. 485–560.
5. Умняшкин С.В., Коплович Д.М. Метод компрессии изображений на основе векторного квантования коэффициентов в области дискретных преобразований // Изв. вузов. Электроника. – 2005. – № 4–5. – С. 149–155.
6. Умняшкин С.В. Вейвлет-компрессия цифровых изображений с прогнозированием статистических моделей // Изв. вузов. Электроника. – 2001. – № 5. – С.86–94.

Поступило
23 октября 2006 г.

Умняшкин Сергей Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, проректор МИЭТ по информатизации и международной деятельности. *Область научных интересов:* цифровая обработка сигналов и изображений.

Коплович Дмитрий Михайлович – аспирант кафедры высшей математики № 1 МИЭТ. *Область научных интересов:* цифровая обработка сигналов и изображений.

Черкасов Илья Владимирович – выпускник МИЭТ 2006 г. *Область научных интересов:* цифровая обработка сигналов и изображений.

Александров Андрей Александрович – студент 5 курса магистратуры МИЭТ. *Область научных интересов:* цифровая обработка сигналов и изображений.

Рентгеновская диагностика структуры и глубины повреждений в механически обработанных пластинах сапфира

А.В.Аникин

ОАО «ЭЛМА» (г. Москва)

Ю.М.Литвинов

ЗАО «ЭЛМА-Малахит» (г. Москва)

В пластинах сапфира ориентации (0001) и $(10\bar{1}2)$ после различных этапов обработки (многопроволочная резка (МПР) связанным алмазным абразивом, двустороннее шлифование (ДСШ) свободным абразивом карбида бора различной зернистости, алмазная полировка (АП) пастой АСМ-5/3, химико-механическое полирование (ХМП)) возникают приповерхностные повреждения. В настоящей работе рентгеновскими методами осуществлена характеристика этих повреждений. Ввиду дороговизны пластин сапфира и КНС-структур (кремний–на–сапфире) для обнаружения и характеристики таких «скрытых» дефектов предложено использовать рентгеновские методы диагностики (преимущественно прямые [1]).

С помощью модели, представленной в [2], проведены расчеты значений c (эквивалентна пластической составляющей приповерхностных повреждений) и b (эквивалентна $D_{\text{дпл}}$) после различных этапов обработки: МПР связанным абразивом, ДСШ свободным абразивом различной зернистости и алмазного полирования пастой АСМ-5/3.

Для обнаружения, визуализации и определения глубины приповерхностных нарушений применялись следующие методы:

- двухкристальная дифрактометрия (ДКД) в отражениях \bar{g} –0006 для ориентации (0001) ($L_{\text{экт}}^{\text{расч}} = 4,9$ мкм, $b_{h/2}^{\text{расч}} = 0,3$ угл. с) и \bar{g} –02 $\bar{2}4$ для ориентации $(10\bar{1}2)$ ($L_{\text{экт}}^{\text{расч}} = 3$ мкм, $b_{h/2}^{\text{расч}} = 2,2$ угл. с) в MoK_α -излучении; измеряемый параметр – полуширина кривой дифракционного отражения (КДО) $b_{h/2}$, характеризующая общую дефектность в пределах толщины информативного слоя, эквивалентного глубине экстинции ($L_{\text{экт}}$);
- секционная рентгеновская топография в отражениях \bar{g} –0006 для ориентации (0001) и \bar{g} –02 $\bar{2}4$ для ориентации $(10\bar{1}2)$ в MoK_α -излучении; визуализируемый и измеряемый параметр – дальнодействующие поля деформаций и их протяженность ($D_{\text{дпл}}$);
- двухкристальная рентгеновская топография (ДКРТ) на отражение в скользящей геометрии дифракции; визуализируемый и измеряемый параметр – дислокации и их плотность;
- для измерения шероховатости после операции разрезания слитка на пластины и двустороннего шлифования B_4C различной зернистости использовался профилограф-профилометр 252;
- для определения локальной шероховатости поверхности образцов сапфира после алмазной полировки использовалась атомно-силовая микроскопия (АСМ).

Результаты исследований после различных видов обработки представлены для ориентации (0001) в табл.1, для ориентации $(10\bar{1}2)$ – в табл.2.

Таблица 1

Результаты исследований пластин сапфира ориентации (0001)

Вид обработки	$b_{h/2}^{\text{эксп}} - b_{h/2}^{\text{расч}}$, угл. с	c , мкм	b , мкм	$D_{\text{длд}}$, мкм	$R_{\text{ас}}$, мкм
Многопроволочная резка связанным абразивом	4,7	12,6	55	—	0,25
ДСШ свободным абразивом В ₄ С 40 мкм	11,7	57,6	250	125	1,11
ДСШ свободным абразивом В ₄ С 20 мкм	5,7	37,7	164	80	0,73

Таблица 2

Результаты исследований пластин сапфира ориентации (10 $\bar{1}2$)

Вид обработки	$b_{h/2}^{\text{эксп}} - b_{h/2}^{\text{расч}}$, угл. с	c , мкм	b , мкм	$D_{\text{длд}}$, мкм	$R_{\text{ас}}$, мкм
Многопроволочная резка связанным абразивом	31,5	16,1	161,0	—	0,53
ДСШ свободным абразивом В ₄ С 40 мкм	33	21,7	217,0	113	0,72
ДСШ свободным абразивом В ₄ С 20 мкм	8	16,5	165,0	93	0,54
Алмазное полирование пастой АСМ-5/3 мкм	23,5	1,5	15,3	—	0,05

Таким образом, различными рентгеновскими методами оценена глубина приповерхностных повреждений в пластинах сапфира ориентации (0001) и (10 $\bar{1}2$). Показано, что $b_{h/2}$ уменьшается с уменьшением зернистости абразива при ДСШ, значения $D_{\text{длд}}$ при ДСШ примерно в два раза меньше расчетных значений, плотность дислокаций составляет $2 \cdot 10^2 \text{ см}^{-2}$ при направлении роста (0001) и $7 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$ при направлении роста (10 $\bar{1}2$).

Литература

1. Боуэн Д.К., Таннер Б.К. Высокорастворимая рентгеновская дифрактометрия и топография // Пер. с англ. – М.: Наука, 2003. – С. 274.
2. Арендаренко А.А., Голодаева Н.Л., Литвинов Ю.М. и др. Глубина и структура повреждений в пластинах GaP, полученных методом многопроволочной резки // Изв. вузов. Электроника. – 2005. – № 2. – С. 32–35.

Поступило 23 октября 2006 г.

Аникин Андрей Владимирович – инженер-технолог отдела новой техники ОАО «ЭЛМА» (г. Москва), аспирант кафедры технологии автоматизированного производства МГОУ. Область научных интересов: механическая обработка пластин кремния и сапфира.

Литвинов Юрий Михайлович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ОАО «ЭЛМА-Малахит» (г. Москва). Область научных интересов: материаловедение полупроводников и методы исследования структуры материалов.

ЮБИЛЕИ



Таирову Юрию Михайловичу – 75 лет

1 ноября 2006 года исполнилось 75 лет профессору, доктору технических наук, заслуженному деятелю науки и техники России, заведующему кафедрой микроэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» Юрию Михайловичу Таирову.

Ю.М. Таиров в 1950 г. поступил в ЛЭТИ, в 1951 г. был репрессирован и сослан в Казахстан как сын «врага народа» по «ленинградскому делу». После реабилитации в 1953 г. Юрий Михайлович вернулся в ЛЭТИ.

Окончив ЛЭТИ в 1959 г. по специальности инженер-электрик, Ю.М. Таиров в числе первых советских молодых ученых был отправлен на стажировку в США. Через год, вернувшись из США, он стал преподавателем, затем заведующим кафедрой и проректором по научной

работе ЛЭТИ. Педагогической деятельности он посвятил 40 лет, научной – 45 лет.

Ю.М. Таиров теоретически обобщил и решил проблему физико-химических основ выращивания политипной структуры ряда широкозонных полупроводников и управления ею. Разработал метод выращивания объемных кристаллов полупроводникового карбида кремния различных политипных модификаций («метод ЛЭТИ»), широко используемый для промышленного производства ведущими фирмами мира. В проблемной лаборатории кафедры диэлектриков и полупроводников (впоследствии кафедра получила название «Микроэлектроника») Ю.М. Таиров, его коллеги и ученики провели пионерские работы в области карбидокремниевых материалов, являющихся базовыми материалами экстремальной

электроники. О полученных результатах сообщалось на всероссийских и международных конференциях. Ю.М.Таиров был председателем организационных комитетов многих проводившихся в СССР и России конференций и семинаров по карбиду кремния и другим широкозонным материалам.

Юрий Михайлович опубликовал более 300 научных трудов в международных и академических журналах, он автор 2 учебников и 5 монографий, имеет более 10 авторских свидетельств.

Ю.М.Таиров ведет большую учебно-научно-методическую работу, является членом ряда научно-технических советов РАН и Минобразования России. Возглавляемый им с 1988 г. учебно-методический совет по специальностям «Материалы и компоненты твердотельной электроники» и «Микроэлектроника и полупроводниковые приборы» внес значительный вклад в развитие российской высшей школы и сохранение единого образовательного пространства в стране.

На кафедре микроэлектроники, которой заведует Ю.М.Таиров, создана теоретическая и экспериментальная база, позволяющая выполнять серьезные международные проекты в сотрудничестве с американскими, немецкими, французскими, шведскими и финскими партнерами.

Юрий Михайлович один из создателей Центра микротехнологии и диагностики (ЦМИД) ЛЭТИ. Член Международного комитета по карбиду кремния, председатель и член программных комитетов отечественных и зарубежных конференций по широкозонным полупроводникам, член Научного совета по физике полупроводников РАН, член редколлегии журналов ФТП, «Изв. вузов. Электроника», «Изв. вузов. Материалы электронной техники» и др. Заслуженный деятель науки и техники РФ (1992), Соросовский профессор (1997–2001), Почетный доктор Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого (2001), награжден орденами Трудового Красного Знамени, Почета и медалями.

Желаем Юрию Михайловичу Таирову крепкого здоровья и дальнейших успехов на благо российской науки и высшей школы.

Редколлегия

CONTENTS

Microelectronics technology

- A.M.Skvortsov, R.A.Khalecky, V.I.Sokolov* Study on Characteristics of Si-SiO₂ Structure with Polysilicon Gate Depending on Thermal Oxidation Conditions..... 3
- S.P.Timoshenkov, S.A.Zotov, V.V.Kalugin, E.P.Prokop'ev, A.A.Vorotnikov, V.G.Rubchizh* Impact of Surface Layer Porosity on Strength of MEMS Pendant Sensitive Element Based on Silicon-on-Insulator Structure 9

Microelectronic devices and systems

- A.A.Gvaskov, G.P.Zhigal'skii, P.O.Sitkin* Investigation of 1/f Noise in MOS transistors with Different Type of Channel Conductivity..... 13
- O.M.Ivanova, S.A.Krutovertsev, V.A.Anisimov, A.G.Borisov, T.D.Tchilikina* Optical Sensor for Detection of Ammonia in Air..... 20

Nanotechnology

- U.A.Chaplygin, D.A.Usanov, Al.V.Skripal, A.V.Abramov, A.S.Bogolyubov* Measurement Methods of Electrical Conductivity of Nanometer Metal Films in Sandwich-Like Structures by Reflection Spectrums of Electromagnetic Radiation 27

Circuit engineering and design

- K.K.Malinauskas* Review of Shortest Path Algorithms as Applied to VLSI Layout Compaction..... 36
- Y.M.Kobzev, V.V.Enns, V.I.Enns* Modeling of Magneto-Sensitive ICs Based on Magnetoresistive Elements 56

Information technologies

- E.E.Yanchuk* Integrated Devices of Numerical Interfacing, Multiplexing and Forming Channels for Radio Relay-Type Communication Links 65
- I.V.Asharina* Methods of Information Agreement in Two-Complex System 73

University education problems

- Yu.A.Chaplygin, A.S.Pospelov, S.A.Gavrilov, A.A.Prokofiev* Centers of Competences as Mechanism of Competent Approach Realization in Innovative Education..... 79

Brief reports

- S.V.Umnyashkin, D.M.Koplovich, I.V.Cherkasov, A.A.Alexandrov* Algorithms for Image Compression Using Vector and Scalar Context Quantification in Wavelet Transform Domain..... 86
- A.V.Anikin, Yu.M.Litvinov* X-Ray Diagnostics of Structure and Depth of Subsurface Damage in Mechanically Processed Sapphire Wafers..... 89

Jubilees

- U.M.Tairov is 75 years old* 91

ABSTRACTS

MICROELECTRONICS TECHNOLOGY

Study on Characteristics of Si-SiO₂ Structure with Polysilicon Gate Depending on Thermal Oxidation Conditions

A.M.Skvortsov, R.A.Khalecky, V.I.Sokolov

The polysilicon gate influence on the nature of the charge change in thermally grown oxide depending on the oxidation conditions has been investigated. It has been demonstrated that the nature of the charge change in silicon dioxide during the polysilicon film formation depends on the level of internal mechanical stresses arising during thermal oxidation.

Impact of Surface Layer Porosity on Strength of MEMS Pendant Sensitive Element Based on Silicon-on-Insulator Structure

S.P.Timoshenkov, S.A.Zotov, V.V.Kalugin, E.P.Prokop'ev, A.A.Vorotnikov, V.G.Rubchizh

The void and cavity migration mechanisms on the boundary in silicon-on-insulator structures have been analyzed. It has been demonstrated that voids with up to 30 μm radius on the boundary are filled during thermal processing of the structures and that permits to manufacture high quality MEMS. The impact of the surface layers on the bend strength of the MEMS pendant sensitive element has been also considered.

MICROELECTRONIC DEVICES AND SYSTEMS

Investigation of 1/f Noise in MOS Transistors with Different Type of Channel Conductivity

A.A.Gvaskov, G.P.Zhigal'skii, P.P.Sitkin

The results of the experimental investigation of 1/f noise in n- and p-channel MOS transistors with induced channel produced by 1.2- μm standard CMOS process route with polysilicon gate have been presented. Such MOS transistors are used for creating the circuits of the signal readout from detectors in two-dimensional image sensors. The structure of the investigated MOS transistors with an induced channel has been described. The dependence of 1/f noise level on the channel conductivity has been revealed. It has been determined that the p-channel MOS transistors have the 1/f noise level approximately 10 times lower than that one of the n-channel MOS transistors.

Optical Sensor for Detection of Ammonia in Air

O.M.Ivanova, S.A.Krutovertsev, V.A.Anisimov, A.G.Borisov, T.D.Tchilikina

Kinetics of ammonia interaction with the Nafion film containing sodium(n-dimethylamino)phenylbenzenesulfonate has been considered. Some parameters of the Nafion film based optical sensor have been estimated.

NANOTECHNOLOGY

Measurement Methods of Electrical Conductivity of Nanometer Metal Films in Sandwich-Like Structures by Reflection Spectrums of Electromagnetic Radiation

U.A.Chaplygin, D.A.Usanov, Al.V.Skripal, A.V.Abramov, A.S.Bogolyubov

The measurement method of electrical conductivity and thickness of metal layers in the sandwich-like structures in the range from unit to thousands nanometers by reflection spectrums of the electromagnetic radiation has been proposed and experimentally implemented.

CIRCUIT ENGINEERING AND DESIGN

Review of Shortest Path Algorithms as Applied to VLSI Layout Compaction

K.K.Malinauskas

In this paper the review of the known solutions for the graph-theoretic problems, arising in the constraint graph-based VLSI layout compaction, has been presented. An overview of the algorithms for finding the shortest paths and negative cycles in the weighted directed graphs has been given. The most significant works published during the last 50 years, which focus on the algorithmic complexity points, have been considered. The constraint graph properties allowing the optimized performance have been elucidated. Based on the review the recommendations concerning usage of different algorithms have been presented.

Modeling of Magneto-Sensitive ICs Based on Magnetoresistive Elements

Y.M.Kobzev, V.V.Enns, V.I.Enns

The design methods for improving the production yield and stability of magneto-sensitive ICs based on magnetoresistive bridges have been considered. An approach to accurate modeling of magnetoresistive bridges in circuit simulators has been given. The described methods have been applied for design of the general-purpose magnetoresistive sensor.

INFORMATION TECHNOLOGIES

Integrated Devices of Numerical Interfacing, Multiplexing and Forming Channels for Radio Relay-Type Communication Links

E.E.Yanchuk

The integrated device for radio relay-type communication links, including the interfacing, multiplexing and forming channels facilities, as well as the schemes of encapsulations and multiplexing of virtual containers when processing the speediest and low-speed flows, has been described. It has been shown that using the developed device enables significantly to enlarge the efficiency of the multimedia system organization of forming the channels and multiplexing for numerical telecommunications with plesiochronous and synchronous numerical hierarchy.

Methods of Information Agreement in Two-Complex System

I.V.Asharina

The conditions, in which it is possible to attain an exact mutual information agreement (MIA) in the two-complex systems, have been described. The algorithms of agreement (MIA) for these systems have been presented.

UNIVERSITY EDUCATION PROBLEMS

Centers of Competences as Mechanism of Competent Approach Realization in Innovative Education

Yu.A.Chaplygin, A.S.Pospelov, S.A.Gavrilov, A.A.Prokofiev

The analysis of the problems, solving which provides a successful realization of the innovative educational program of MIET, has been performed. The program is based on a competent approach and supposes an introduction of a three-level educational system. The centers of competences, organized at the University, are considered as the main mechanism of the approach realization.

BRIEF REPORTS

Algorithms for Image Compression Using Vector and Scalar Context Quantification in Wavelet Transform Domain

S.V.Umnyashkin, D.M.Koplovich, I.V.Cherkasov, A.A.Alexandrov

An image compression algorithm based on the vector and scalar context quantification of the wavelet transform coefficients has been proposed. It has been shown that the choice of the quantification method is made by minimizing the corresponding RD cost function, the effective compression is achieved by using the coding of the output data flows in several statistical models of the arithmetic coder, which are chosen depending on the context prediction. While testing the algorithm the compression quality comparable to the state-of-the-art JPEG 2000 algorithm has been obtained.

X-Ray Diagnostics of Structure and Depth of Subsurface Damage in Mechanically Processed Sapphire Wafers

A.V.Anikin, Yu.M.Litvinov

The X-Ray analysis of depth and structure of the damages after multiwave cutting by the constrained abrasive, double-side lapping abrasive of various graininess and the diamond polished wafers of sapphire of (0001) and (1012) orientation has been performed. The obtained experimental data correlate well with the presented model in prediction of the subsurface damage depths.

Тематический указатель статей, опубликованных в 2006 году

Фундаментальные исследования

Горбачев А.А., Широков А.Е. Метод эффективной массы и поверхностные состояния. № 5, с. 7.

Материалы электронной техники

Максимов С.К. Упорядоченная фаза La_2CaF_8 с модифицированной структурой тисонита. № 4, с. 3.

Технология микроэлектроники

Апрелов С.А., Герасименко Н.Н., Рыбачек Е.Н., Сенков В.М., Пиришин И.В., Турьянский А.Г., Цехош В.И. Двухволновая рентгеновская рефлектометрия пленок металлов и их силицидов на кремнии. № 5, с. 27.

Аскинази А.Ю., Барабан А.П., Милоглядова Л.В., Сазонов С.Г., Сергиенко М.В. Влияние ионной имплантации и УФ-облучения на зарядовое состояние структуры Si-SiO_2 . № 3, с. 7.

Барабан А.П., Петров Ю.В., Сазонов С.Г. Электролюминесценция структур Si-SiO_2 , содержащих избыточный кремний. № 2, с. 3.

Батюня Л.П. Технологические аспекты получения тонкопленочных структур для высокотемпературных сверхпроводников. № 1, с. 9.

Грибов Б.Г., Лысак Л.В., Мартемьянов В.С. Новый метод очистки кремниевых пластин. № 5, с. 15.

Гущин О.П., Данилкин Е.В., Мочалов А.И. Травление кремния методом переменной модуляции газов SF_6 и C_4F_8 . № 4, с. 8.

Зайцев Н.А., Матюшкин И.В. Исследование кинетики начального этапа высокотемпературного окисления кремния в сухом кислороде. № 2, с. 9.

Каракеев В.И., Рябышенков А.С. Обеспечение равномерности воздушного потока в чистом помещении высокотехнологичного производства. № 1, с. 13.

Ковалев А.А. Особенности технологического процесса очистки полупроводниковых структур на основе электрохимического синтеза и рекуперации растворов. № 4, с. 13.

Королёв М.А., Крупкина Т.Ю., Логинов В.В. Учет пространственной неоднородности распределения ловушек при моделировании КНИ МОП-структур. № 3, с. 3.

Манжа Н.М., Сауров А.Н. Влияние температуры осаждения на структуру слоев поликристаллического кремния. № 3, с. 14.

Рембеза Е.С., Рембеза С.И., Свистова Т.В., Дырда Н.Н. Методы повышения газочувствительных свойств пленок SnO_2 для датчиков газов. № 1, с. 3.

Скворцов А.М., Халецкий Р.А., Соколов В.И. Исследование характеристик структуры Si-SiO_2 с поликремниевым затвором в зависимости от режимов термического окисления. № 6, с. 3.

Тимошенков В.П. Расчет индуктивности корпуса для СВЧ интегральных микросхем. № 4, с. 18.

Тимошенков В.П. Состояние и перспективы развития технологии кремниевых гетеропереходных биполярных транзисторов для СВЧ применений. № 5, с. 19.

Тимошенков С.П., Зотов С.А., Калугин В.В., Воротников А.А., Рубчиц В.Г., Прокопьев Е.П. Влияние пористости поверхностных слоев на жесткость подвеса чувствительного элемента МЭМС на основе структур КНИ. № 6, с. 9.

Микроэлектроника и полупроводниковые приборы^{*}

- Алексеев Ю.И., Малиев И.В., Нащанский С.А.* Исследование влияния лазерного излучения на частоту колебаний ганновского генератора. № 2, с. 34.
- Безрядин Н.Н., Асessorов В.В., Сизов С.В., Михайлюк Е.А., Сынов Ю.В., Кузьменко Т.А., Пахомов В.Н.* Влияние металла на поверхностные электронные состояния кремния в слоистой системе $Me-Ga_2Se_3-(SiO_x)Si$. № 2, с. 18.
- Белин А.М., Никифоров А.Ю., Гваськов А.А., Попов А.Д., Рудаков Г.А.* Мультиплексор для охлаждаемого гибридного многоэлементного приемника ИК-излучения. № 1, с. 18.
- Бирюков В.Н.* Модель барьерной емкости диода с короткой базой. № 4, с. 31.
- Григорашвили Ю.Е., Карпов Р.Г., Степанов А.М.* Метод локации источников слабых магнитных полей. № 2, с. 37.
- Ионычев В.К., Ребров А.Н.* Численный расчет вероятности включения микроплазмы в $p-n$ -переходе. № 4, с. 23.
- Козлов А.В., Парменов Ю.А.* Влияние скорости поверхностной рекомбинации на относительную чувствительность биполярного магнитотранзистора. № 3, с. 27.
- Коноплев Б.Г., Рындин Е.А.* Интегральные логические элементы на основе туннельно-связанных наноструктур. № 3, с. 18.
- Кострюков С.А., Холомина Т.А.* Программное обеспечение НЧ шумовой спектроскопии глубоких уровней. № 4, с. 36.
- Лугин А.Н.* Учет тензочувствительности для толстопленочных резисторов на основе соединений рутения. № 1, с. 25.
- Строганов А.В., Горлов М.И.* Использование нейронных сетей в задачах прогнозирования деградации выходных параметров ИС. № 4, с. 44.
- Широков А.А., Сергеев В.А., Дулов О.А.* Исследование токораспределения в биполярных транзисторах электрофлуктуационным методом. № 2, с. 26.
- Яремчук А.Ф., Мазуров А.В., Соколов Е.М., Шерченков А.А.* Метод оценки электрических параметров солнечных элементов в процессе контроля их эксплуатационных характеристик. № 4, с. 53.

Микроэлектронные приборы и системы

- Иванова О.М., Крутоверцев С.А., Анисимов В.А., Борисов А.Г., Чиликина Т.Д.* Оптический сенсор для определения аммиака в воздухе. № 6, с. 20.
- Бобрешов А.М., Дыбой А.В., Китаев Ю.И., Нестеренко Ю.Н., Усков Г.К., Обрезан О.И.* Исследование обратимых отказов GaAs ПТШ при импульсных перегрузках. № 5, с. 69.
- Гваськов А.А., Жигальский Г.П., Ситкин П.О.* Исследование $1/f$ -шума МДП-транзисторов с разным типом проводимости канала. № 6, с. 13.
- Горлов М.И., Смирнов Д.Ю., Ануфриев Д.Л.* Классификация надежности интегральных схем с использованием показателя формы спектра γ . № 5, с. 78.
- Зайцев Д.Л., Дудкин П.В., Агафонов В.М.* Вихревые флуктуирующие потоки и их вклад в шумы молекулярно-электронных преобразователей. № 5, с. 61.
- Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Кострицкий С.М., Алкаев А.Н., Прилуцкий В.Е., Пономарев В.Г., Морев И.В., Марчук В.Г., Падерин Е.М.* Интерферометрические волоконно-оптические гироскопы с замкнутым контуром обратной связи. № 5, с. 45.
- Орликовский А.А.* Кремниевая транзисторная наноэлектроника. № 5, с. 35.

^{*}С № 5, 2006 заменена на рубрику «Микроэлектронные приборы и системы».

Нанотехнология

Белов А.Н., Гаврилов С.А. Синтез полупроводниковых нитевидных нанокристаллов методом импульсного электрохимического осаждения с дальнейшей сульфидизацией. № 1, с. 31.

Белов А.Н., Гаврилов С.А., Путря М.Г., Шевяков В.И. Нанотехнологии на основе анодных оксидных материалов. № 5, с. 93.

Максимов С.К. Механизм наноструктурирования нестехиометрических фторидов $Ba_{1-x}La_xF_{2+x}$ и $Ca_{1-x}La_xF_{2+x}$ с решеткой на основе CaF_2 . № 5, с. 83.

Чаплыгин Ю.А., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С. Методика изменения электропроводности нанометровых металлических пленок в слоистых структурах по спектрам отражения электромагнитного излучения. № 6, с. 27.

Схемотехника и проектирование

Артемьев С.А. Конвертор для перевода проектов схем из САПР ПЛИС в САПР БМК. № 2, с. 57.

Кобзев Ю.М., Эннс В.В., Эннс В.И. Моделирование интегральных магниточувствительных схем на основе магниторезистивных элементов. № 6, с. 56.

Малинаускас К.К. Обзор алгоритмов поиска кратчайших путей в задачах сжатия топологии ИС. № 6, с. 36.

Соколов А.Г., Чепурных Е.А. Комплекс программ для автоматизированного проектирования интерфейсов цифрового оборудования. № 2, с. 52.

Стемковский А.Л., Гаврилов С.В., Глебов А.Л. Статистический подход к временному анализу цифровых схем. № 5, с. 99.

Петросянец К.О., Торговников Р.А. Сравнительный анализ схемотехнических моделей SiGe гетеропереходного биполярного транзистора. № 5, с. 107.

Микросистемы

Комиссаров А.В., Степанов Н.В. Методы расширения диапазона измерений угловых скоростей микромеханических гироскопов ADXRS150, ADXRS300. № 2, с. 77.

Фёдоров Р.А., Шелепин Н.А. PSPICE-модель электретного преобразователя физических величин. № 4, с. 59.

Микропроцессорная техника

Беляев А.А., Путря Ф.М. Выбор оптимальной структуры функционально полного контроллера шины SPI с 32-разрядным интерфейсом. № 4, с. 71.

Ельчин И.С., Шагурин И.И., Осипенко П.Н., Василегин Б.В. Аппаратные средства введения помехоустойчивого кодирования для повышения отказоустойчивости СБИС оперативной памяти. № 4, с. 65.

Капустян С.Г. Децентрализованный метод коллективного распределения целей в группе роботов. № 2, с. 84.

Переверзев А.Л. Обнаружение импульсного сигнала с применением медианной фильтрации. № 1, с. 36.

Романов С.П. Повышение помехоустойчивости контроллера магистрального параллельного интерфейса. № 3, с. 32.

Сиренко В.Г. Метод локализации «враждебных» неисправностей в многомашинных вычислительных системах. № 3, с. 38.

Информационные технологии

- Абрамов А.Ю., Портнов Е.М.** Способ организации канала «прямых» измерений параметров распределительных электросетей. № 3, с. 50.
- Ашарина И.В.** Методы информационного согласования в двухкомплексной системе. № 6, с. 6.
- Беневоленский С.Б., Жадан В.Г., Жадан И.В., Спыну С.К.** Применение технологии распределенных вычислений при решении задач методом половинных делений для глобальной оптимизации функции многих переменных. № 3, с. 44.
- Власов А.А., Скулкин Н.М., Зуев А.В.** Использование экспертной системы для распознавания дефектов металлокерамических корпусов и коммутационных плат. № 2, с. 47.
- Гагарина Л.Г., Слюсарь В.В.** Методология оценки эффективности работы автоматизированной информационно-поисковой системы на основе интегральных критериев уровня качества поиска. № 2, с. 42.
- Джисиган В.И.** Использование обратного QR-разложения в многоканальных FAP-алгоритмах. № 1, с. 60.
- Корнилов А.И., Калашников В.С., Ласточкин О.В., Семенов М.Ю.** Особенности построения умножителей по модулю $(2^n - 1)$. № 1, с. 55.
- Янчук Е.Е.** Интегрированные устройства цифрового сопряжения мультиплексирования и каналообразования для радиорелейных линий связи. № 6, с. 65.

Интегральные радиоэлектронные устройства

- Джисиган В.И.** Адаптивные фильтры на основе последовательных лестничных RLS-алгоритмов с априори ошибками. № 3, с. 61.
- Зиновьев Д.В.** Система ФАПЧ на цифровых логических элементах. № 2, с. 71.
- Клюев Д.С., Неганов В.А.** Расчет входного сопротивления узкой полосковой кольцевой антенны на основе сингулярного интегрального уравнения с ядром Гильберта. № 4, с. 76.
- Комаров В.В.** Аналитическая аппроксимация дисперсии электромагнитных волн в волноводах с поперечно-неоднородным диэлектрическим заполнением. № 3, с. 76.
- Меркутов А.С.** Маршрут автоматизированного проектирования радиоприемных устройств цифровых сигналов. № 3, с. 70.
- Маркосян Е.С.** Исследование характеристик несимметричных пассивных полифазных фильтров. № 1, с. 47.
- Чистюхин В.В.** Излучающая апертура АФАР Ку-диапазона для приема спутникового телевидения. № 1, с. 41.
- Чистюхин В.В., Лялин К.С., Сизов В.И., Кочетков В.Ю.** Пространственное подавление помех с использованием цифровой антенной решетки. № 2, с. 64.
- Чистюхин В.В., Сизов В.И., Лялин К.С., Викторюков Ю.С., Семенов А.В.** Мобильная АФАР для приема сигнала спутникового телевидения. № 3, с. 54.

Методы и техника измерений

- Автуничи О.А., Красин А.А.** Способ оценки неидентичности конденсаторов в блоке подстройки частоты кварцевого генератора. № 1, с. 68.
- Бельский М.Д., Суворинов А.В., Филиппчук Т.С., Шахбазов С.Ю.** Расчет технологических допусков в электростатических линзах для электронно-лучевых микроколонн. № 1, с. 76.
- Горлов М.И., Смирнов Д.Ю., Ануфриев Д.Л.** Разделение интегральных схем по надежности с использованием $1/f$ -шума. № 1, с. 84.
- Дёмкин В.И., Макаров Е.С., Никулин В.Б.** Структура координатной системы движущихся объектов. № 3, с. 82.
- Филиппов В.В., Поляков Н.Н., Мищук С.В.** Восьмизондовый метод совместных измерений электропроводимости и коэффициента Холла анизотропных полупроводниковых пленок. № 4, с. 81.

Проблемы высшего образования

Усанов Д.А. Школа А.Ф.Иоффе как пример единства науки, образования и производства. № 5, с. 118.

Чаплыгин Ю.А., Поспелов А.С., Гаврилов С.А., Прокофьев А.А. Центры формирования компетенций как механизм реализации компетентностного подхода в подготовке и переподготовке инженерных кадров для инновационной экономики. № 6, с. 79.

Краткие сообщения

Алексейчук А.В., Батюня Л.П., Раскин А.А. Особенности технологии изготовления кантилеверов. № 1, с. 92.

Аникин А.В., Литвинов Ю.М. Рентгеновская диагностика структуры и глубины повреждений в механически обработанных пластинах сапфира. № 6, с. 89.

Вернер В.Д. О терминологии микросистемной техники (в порядке дискуссии). № 3, с. 87.

Зотов С.А. Метод контроля номинальных значений емкостей МЭМС. № 4, с. 90.

Калугин В.В. Подготовка и сборка микромеханических элементов с емкостной системой съема перемещений. № 4, с. 92.

Малкова А.С., Пашинкин А.С., Надыров Ш.М. Теплоемкость антимонидов алюминия, галлия, индия. № 2, с. 94.

Названов В.Ф., Сусяков Ю.В. Об одной особенности спектральной характеристики гетероструктуры ZnS–GaP. № 3, с. 85.

Неустроев А.С., Неустроев С.А. Сопоставление рентгеновского и пикнометрического методов оценки качества слоев нитрида алюминия. № 2, с. 92.

Никулин В.Б., Иноземцев Н.В. Сравнение статистического и интервального методов при решении задач градуировки средств измерения. № 1, с. 90.

Новиков С.Г., Гурин Н.Т., Корнеев И.В. Моделирование фотоприемника с отрицательной проводимостью на основе полупроводниковой структуры. № 4, с. 88.

Умняшкин С.В., Коплович Д.М., Черкасов И.В., Александров А.А. Алгоритм сжатия изображений на основе контекстного скалярно-векторного квантования в области дискретного вейвлет-преобразования. № 6, с. 86.

Шорин Д.В. Методика разработки многофункциональной операционной системы для смарт-карты. № 2, с. 96.

Юбилей

Вернер В.Д. Журналу «Известия высших учебных заведений. Электроника» – 10 лет. № 5, с. 3.

Кубареву Юрию Васильевичу – 70 лет. № 5, с. 126.

Коледову Леониду Александровичу – 70 лет. № 2, с. 97.

Мурыгину Виктору Ивановичу – 80 лет. № 1, с. 94.

Неустроеву Степану Архиповичу – 80 лет. № 5, с. 124.

Носову Юрию Романовичу – 75 лет. № 5, с. 125.

Таирову Юрию Михайловичу – 75 лет. № 6, с. 91.

Конференции. Семинары. Выставки

14 Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2007». № 6, 3 стр. обложки.

V Международная научно-техническая конференция «Электроника и информатика – 2005» (23–25 ноября 2005 г.). № 1, с. 96.

Международная школа-конференция по приоритетным направлениям науки и техники с участием молодых ученых, аспирантов и студентов стран-членов СНГ «Информационно-телекоммуникационные системы» (23–24 ноября 2005 г.). № 1, с. 97.

I Межотраслевое совещание по подготовке и переподготовке специалистов в области проектирования современной электронной компонентной базы и микроэлектронных систем (22 ноября 2005 г.). № 1, с. 98.

Всероссийская конференция инновационных проектов аспирантов и студентов по приоритетному направлению «Индустрия наносистем и материалы» (16–17 ноября 2005 г.). № 1, с. 99.

Международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в науке, технике и образовании» (27 сентября 2005 г., Республика Абхазия, Пицунда). № 1, с. 100.

Десятая международная научная конференция и молодежная школа-семинар «Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники» ПЭМ–2006. № 2, с. 25.

Международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в науке, технике и образовании». № 2, с. 76.

Вернер В.Д., Ильков А.В. Инновации для инноваций (выставка «Продуктроника – 2005». г. Мюнхен, Германия). № 3, с. 89.

Об итогах 13-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2006». № 3, с. 93.

Международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в науке, технике и образовании». № 3, с. 49.

Десятая международная научная конференция и молодежная школа-семинар «Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники» ПЭМ–2006. № 3, с. 75.

Телемост «Кремль – регионы». № 4, с. 94.

Всероссийский конкурс инновационных проектов аспирантов и студентов «Индустрия наносистем и материалы». № 5, 2 стр. обложки.

Открытие совместной образовательной программы МИЭТ и компании Synopsys. № 5, 2 стр. обложки.

I специализированная выставка научных работ студенческой лаборатории «Фотоника II – VI». № 5, с. 82.

14-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика - 2007»

Московский государственный институт электронной техники (технический университет) проводит 18–20 апреля 2007 года 14-ю Всероссийскую межвузовскую научно-техническую конференцию студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика - 2007».

Оргкомитет приглашает молодых исследователей принять участие в работе конференции.

Научные направления работы конференции (по секциям):

1. Нанотехнологии в электронике.
2. Материалы микро-, опто- и наноэлектроники.
3. Проектирование и технология электронных компонентов.
4. Микро- и наносистемная техника.
5. Опто- и акустоэлектроника.
6. Математические модели и алгоритмы в информатике.
7. Автоматизированные информационные системы.
8. Информационно-управляющие и вычислительные системы и приборы.
9. Телекоммуникационные системы и связь.
10. Биомедицинская электроника.
11. Экологические аспекты микро- и наноэлектроники.
12. Менеджмент и маркетинг наукоемких производств.
13. Интегрированные системы менеджмента качества.

Форма участия в работе конференции — выступление с секционным докладом. Продолжительность доклада — до 8 мин.

По итогам работы секций будет проводиться конкурс работ, авторами которых являются только студенты и/или аспиранты. Лучшие работы будут отмечены дипломами лауреатов.

Ответственный секретарь Оргкомитета — Харач Валентина Павловна.

Адрес Оргкомитета: 124498, Москва, г. Зеленоград, проезд 4806, д. 5, МИЭТ, ОНТИ, на конференцию «МЭИнф-2007».

Тел. (495) 532-98-30

Факс (495) 530-54-29

e-mail: id@rnd.miee.ru (тезисы по электронной почте не принимаются).