

# Известия высших учебных заведений

## ЭЛЕКТРОНИКА 4'2008



*Научно-технический журнал*

*Издается с 1996 г.*

*Выходит 6 раз в год*

### СОДЕРЖАНИЕ

#### Материалы электронной техники

- Вигдорович Е.Н., Свешников Ю.Н.* Получение кванто-  
во-размерных гетероструктур на основе GaN ..... 3

#### Микроэлектронные приборы и системы

- Хайновский В.И., Игнатьева Е.А., Уздовский В.В.* Фотоэлектрические процессы в пятидиодной верти-  
кально интегрированной спектрально-селективной  
фотоячейке ..... 10

- Лосев В.В.* Инжекционные фотодиоды на основе низ-  
коомных монокристаллов ZnS ..... 17

- Мальцев А.В.* Особенности движения заряженных ча-  
стиц в ВЧ-поле при амплитудной модуляции питаю-  
щего напряжения квадрупольного фильтра масс..... 22

#### Схемотехника и проектирование

- Булах Д.А.* Применение компиляционного подхода  
к моделированию аналоговых схем ..... 26

- Крупкина Т.Ю., Лосев В.В., Муханюк Н.Н., Путьра М.Г.* Автоматизация проектирования библиотек стандарт-  
ных элементов на основе параметризованных ячеек  
в САПР Cadence ..... 31

#### Интегральные радиоэлектронные устройства

- Орешкин В.И., Лялин К.С., Чиркунова Ж.В.* Особенности  
проектирования цифровых антенных решеток..... 36

- Садков В.Д., Уткин В.Н.* Разработка чип-аттенюатора  
для поверхностного монтажа на основе распределен-  
ных резистивных структур..... 42

#### Учредители:

Министерство  
образования и науки  
Российской Федерации

Московский  
государственный институт  
электронной техники  
(технический университет)

Главный редактор  
*В.Д.Вернер*

#### Редакционная коллегия:

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

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

© "Известия вузов.  
Электроника", 2008  
© МИЭТ, 2008

## Методы и техника измерений

**Максимов С.К.** Особенности, методика и преимущества интегрального метода исследования текстур наноразмерных кристаллитов в электронной микроскопии. II. Практическая реализация метода..... 47

**Вернер В.Д., Гайдуков Г.Н., Пагин П.С.** Исследование влияния модификации поверхности микрорезонаторов на их частотные свойства..... 55

**Бурдинский И.Н.** Применение программируемой матричной логики для корреляционной обработки шумоподобных гидроакустических сигналов ..... 62

## Краткие сообщения

**Милешко Л.П.** Влияние режима формирования анодных оксидных пленок кремния в гальваностатическом режиме на содержание в них фосфора ..... 68

**Бирюков В.Н.** Четырехпараметрическая  $C_{\infty}$ -непрерывная компактная модель полевого транзистора ..... 69

**Батырев Е.В., Тхейн Лин У** Лепестковый датчик угловых координат солнечной энергетической установки.. 72

**Гуреев А.В., Воронин С.Е.** Генератор гауссовских импульсов для сверхширокополосных передатчиков ..... 74

**Трояновский В.М.** Компьютерное моделирование процедур идентификации динамических объектов ..... 76

**Ездаков А.Л.** Объектно-ориентированная диагностическая экспертная система «МАЛЭКС» ..... 78

## Конференции

**Вернер В.Д., Сауров А.Н., Резнев А.А.** Выбор тактики и стратегия производства изделий электроники (выставка «Продуктроника — 2007», г. Мюнхен, Германия) ..... 80

Об итогах 15-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика — 2008» ..... 88

## Юбилей

Орликовскому Александру Александровичу - 70 лет.. 90

К 90-летию со дня рождения Преснухина Леонида Николаевича ..... 92

К 100-летию со дня рождения Лукина Федора Викторовича ..... 95

Памяти Курова Грациана Александровича ..... 98

Contents ..... 99

Abstracts ..... 100

К сведению авторов ..... 103

Заведующая редакцией  
**С.Г.Зверева**

Редактор  
**А.В.Тихонова**

Научный редактор  
**С.Г.Зверева**

Художественный редактор  
**А.В.Тихонова**

Корректор  
**Л.Ф.Летунова**

Технический редактор  
**Л.Г.Лосякова**

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

Подписано в печать 9.07.08.  
Формат бумаги 60х84 1/8.  
Печать офсетная.  
Объем 12,09 усл.печ.л.,  
10,8.-изд.л.  
Заказ № 76.

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

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

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



# МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

УДК 621.592

## Получение квантово-размерных гетероструктур на основе GaN

*Е.Н.Вигдорович*

Московский государственный университет приборостроения и информатики

*Ю.Н.Свешников*

ЗАО «Элма-Малахит» (г. Москва)

Экспериментально исследован двухстадийный МОС-гидридный метод получения слоев GaN. Рассмотрены некоторые вопросы легирования слоев донорными и акцепторными примесями. Определены закономерности влияния технологических режимов на скорость роста, состав и функциональные характеристики квантово-размерных гетероструктур на основе GaN с множественными квантовыми ямами.

Оптоэлектронные компоненты – светоизлучающие диоды (СИД), лазеры, фотоприемники и изделия на их основе находят все более широкое применение в транспорте (автомобильном, железнодорожном, водном и т.д.), в системах безопасности дорожного движения (светофоры, семафоры, маяки и т.д.), в системах средств связи, светотехнике, рекламе и многих других отраслях [1, 2].

Как известно, все оттенки существующих цветов можно создать комбинацией трех основных цветов – красного (650–700 нм), зеленого (540–570 нм) и голубого (430–490 нм), поэтому для создания современных полупроводниковых систем отображения информации необходимы материалы, позволяющие изготавливать излучатели данных диапазонов. В настоящее время, используя жидкофазные и газофазные методы получения, разработаны достаточно эффективные структуры для излучателей красного, желтого и зеленого свечения. Уже в начале 70-х гг. XX в. появилось много публикаций, указывающих на то, что наиболее перспективным для создания полупроводниковых излучателей зелено-голубой области является GaN и InGaN.

**Механизм кристаллизации.** Основным методом получения GaN в настоящее время является МОС-гидридная эпитаксия [3, 4]. С целью получения качественных зародышевых слоев целесообразно гетероэпитаксию проводить сначала при высоком пересыщении и в момент перехода к автоэпитаксии, резко уменьшая пересыщение в системе, переходить на условия более совершенного двумерного зародышеобразования. Основные этапы гетероэпитаксии GaN можно проследить с помощью лазерной (оптической) рефлектометрии (ЛРМ).

Исследования проводились на установке с вертикальным реактором при пониженном давлении и при скорости вращения пьедестала  $1500 \text{ мин}^{-1}$ . В качестве исходных использовали подложки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  производства ОАО ЗСК «Монокристалл» (г. Ставрополь),

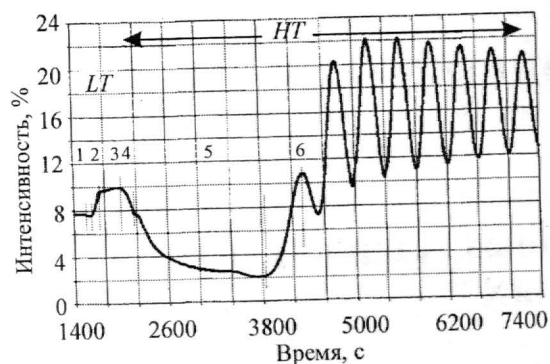


Рис.1. Рефлектограмма эпитаксии GaN: 1 – инкубационный период; 2 – образование докритических зародышей; 3 – образование трехмерных зародышей; 4 – первичная коалесценция; 5 – вторичная коалесценция; 6 – двумерный автоэпитаксиальный рост

триметилгаллия (ТМГ) и аммиак ( $\text{NH}_3$ ) отечественного производства. Результаты приведены на рис.1. На рефлектограмме наблюдаются все фазы формирования структуры при двухстадийной МОС-гидридной эпитаксии. После инкубационного периода образование трехмерных зародышей происходит при низкой ( $600^\circ\text{C}$ ) температуре (LT), т.е. при высоком пересыщении. Первичная коалесценция, связанная с разрастанием зародышей, происходит во время отжига при повышении температуры (уменьшении пересыщения) и сопровождается изменением их формы и ориентации. При этом происходит уменьшение плотности зародышей и образование «диффузионных зон». Вторичная коалесценция при температуре  $1050^\circ\text{C}$  (HT) сопровождается срастанием со-

седних островков в процессе их разрастания и обнажением больших участков подложки, на которых возможно вторичное зародышеобразование. Перед автоэпитаксиальным ростом происходит образование кристаллографической сетки с большим количеством пор (каналов), заполнение этих каналов и сглаживание поверхности роста, т.е. переход к двумерному росту.

Оптимизация свойств слоев позволила определить характеристики начальных этапов формирования гетероструктур. Толщина трехмерного низкотемпературного ( $450\text{--}650^\circ\text{C}$ ) зародышевого слоя не должна превышать  $20\text{--}25\text{ нм}$ . Отжиг зародышевого слоя происходит при повышении температуры до  $1020\text{--}1070^\circ\text{C}$  и при уменьшении расхода  $\text{NH}_3$  в системе, что создает хорошие условия для перехода от трехмерного к двумерному росту малодефектных буферных слоев. Следующие (автоэпитаксиальные) слои активной области гетероструктуры выращивались при увеличенных расходах  $\text{NH}_3$  и при высоких температурах (низкое пересыщение).

На рис.2 приведены полученные методом электронной микроскопии микрофотографии поверхности GaN на разных этапах формирования буферного слоя. Полученные в этих условиях слои GaN имели концентрацию носителей меньше  $5 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$  и подвижность более  $500\text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . После оптимизации условий роста ширина линии качания (FWHM-XRD) составляет  $0,1\text{--}0,15^\circ$  и в спектре ФЛ практически отсутствует желтая (525 нм) полоса, что говорит о хорошем структурном совершенстве получаемых слоев.

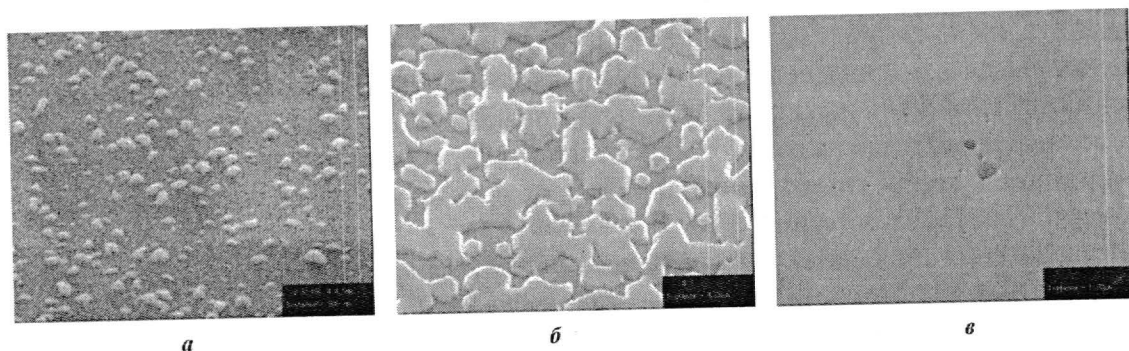


Рис.2. Вид поверхности, полученной методом электронной микроскопии: а – зародышевый слой; б – вторичная коалесценция; в – начало автоэпитаксии



Уменьшить энергетический скачок при переходе от гетероэпитаксии к автоэпитаксии можно, снизив поверхностную энергию подложки. Одним из способов снижения поверхностной энергии подложки является создание монокристаллических слоев AlN на сапфире. Это достигается или нитридизацией поверхности сапфира, или нанесением тонкого слоя Al на сапфир перед эпитаксией GaN. При этом в обоих случаях на поверхности сапфира образуется слой AlN, у которого значение поверхностной энергии близко к GaN. В этом случае процесс зарождения GaN можно практически сразу реализовать по двумерному механизму, что позволяет получать слои с высоким кристаллографическим совершенством.

В частности, уровень FWHM-XRD  $0,1-0,08^\circ$  был достигнут при нитридизации сапфира (в течение 60 с) с последующим получением монокристаллических слоев Al перед выращиванием буферного слоя  $\text{Al}_{0,05}\text{Ga}_{0,95}\text{N}$  (25–30 нм).

**Получение слоев GaN *n*-типа.** При получении легированных слоев GaN МОС-методом, независимо от условий эпитаксии, получается устойчивый электронный тип проводимости. Это связывают главным образом с возникновением в слоях высокой концентрации азотных вакансий и «неконтролируемым» легированием Si, O<sub>2</sub> и C. Теоретические расчеты позволяют определить возможную концентрацию  $V_N$  на уровне  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Причиной возникновения высокой плотности вакансий  $V_N$  является использование в реакции получения GaN в качестве носителя азота достаточно устойчивого при высоких температурах  $\text{NH}_3$ . Источником Si, O<sub>2</sub> и C является кварцевая оснастка  $\text{SiO}_2$  и исходные вещества в виде металлоорганических соединений. Экспериментальные исследования показывают, что концентрация Si, O<sub>2</sub> и C в слоях может достигать  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Примеси Si, O<sub>2</sub>, C и структурные дефекты, как правило, образуют друг с другом различные нейтральные и электроактивные комплексы, которые, как показывают исследования, легко распадаются при температурах более 600 К и поэтому в основном в эпитаксиальном GaN играют роль активных доноров.

Для получения легированных слоев *n*-типа легирование проводилось с использованием силана  $\text{SiH}_4$ . Наблюдалась практически линейная зависимость концентрации носителей заряда от содержания силана в газовой фазе. Получена концентрация носителей заряда  $2-4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  при подвижности  $150-180 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . При получении слоев  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$  в аналогичных условиях и подвижность, и концентрация носителей заряда снижаются, что вероятнее всего связано с повышением компенсации в слоях.

**Получение слоев GaN *p*-типа.** Основными акцепторами в GaN являются Zn и Mg, но создание дырочного типа проводимости в GaN является серьезной проблемой. Как было показано ранее, даже при концентрации акцепторов (Mg, Zn) до  $10^{20} \text{ см}^{-3}$  получаются высокоомные, компенсированные (*i*-типа) слои. Причиной получения в процессе эпитаксии и легирования акцепторами GaN высокоомных слоев является образование нейтральных комплексов акцептора с водородом  $(\text{Me}^- - \text{H}^+)^0$ . Различными способами – или обработкой при низких температурах потоком низкоэнергетичных электронов (ЛЕЕВИ), или высокотемпературным отжигом в инертной атмосфере (RTA) – снижается концентрация водорода в слоях, и доля связанных акцепторов при этом уменьшается. Так, при ЛЕЕВИ удается снизить удельное сопротивление легированных магнием слоев GaN с  $10^4$  до  $3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , а при RTA – с  $10^6$  до  $2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  и ниже и получать устойчивый *p*-тип проводимости.

**Зависимость скорости роста от температуры.** С целью выяснения механизма кристаллизации слоев GaN в МОС-гидридном процессе исследовалась температурная зависимость скорости роста. Результаты представлены на рис.3. Анализ полученной температурной зависимости скорости роста при различном избытке аммиака позволяет сделать некоторые заключения о механизме кристаллизации.

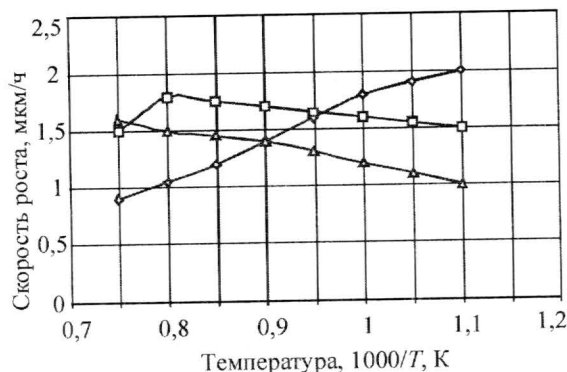


Рис.3. Зависимость скорости роста эпитаксиальных слоев GaN от температуры при различных расходах аммиака (МОС-метод, ТМГ-20 мкмоль/мин): ◇ – 1 л/мин; Δ – 2 л/мин; □ – 1,5 л/мин

В отличие от хлоридного и хлоридно-гидридного процессов, в которых четко наблюдаются две области – кинетическая, где лимитирующей стадией является гетерогенная реакция на поверхности растущего слоя, и диффузионная, где определяющей стадией является массоперенос в газовой фазе, в рассматриваемом случае наблюдается незначительная зависимость скорости роста от температуры в широком интервале температур, причем зависимость при разном расходе аммиака имеет различный характер.

Анализ полученных зависимостей позволяет говорить о решающей роли адсорбционных процессов на поверхности кристаллизации. При невысоких расходах аммиака (до 1 л/мин) или низких соотношениях V/III при повышении температуры скорость роста уменьшается, что может быть связано со снижением на поверхности концентрации адсорбированных молекул элемента III группы, которая и лимитирует скорость роста слоев. При избытке аммиака (1–2 л/мин) наблюдается незначительное увеличение скорости роста при повышении температуры роста. Это говорит о том, что определяющим в этом случае является или хемосорбция элемента V группы, или гетерогенное разложение аммиака на поверхности кристаллизации. Дальнейшее увеличение расхода аммиака (более 2 л/мин) приводит к снижению скорости роста, что вероятнее всего связано с блокировкой центров сорбции на поверхности и снижением в связи с этим концентрации элементов III группы, определяющих скорость роста.

**Влияние технологических параметров на состав твердых растворов.** Как показывает термодинамический анализ, зависимость состава твердых растворов  $Ga_{1-x}In_xN$  и  $Ga_{1-x}Al_xN$  от состава газовой фазы имеет отличительные особенности, что определяется физико-химическими свойствами участвующих в процессе эпитаксии веществ. Исследовалось влияние температуры эпитаксии на состав твердых растворов  $Ga_{1-x}In_xN$  и  $Ga_{1-x}Al_xN$  при различных концентрациях In и Al в газовой фазе, которая задавалась соотношением МОС In/МОС Ga + МОС In и МОС Al/МОС Ga + МОС Al в газовой фазе. При этом суммарное количество МОС в газовой фазе оставалось постоянным. На рис.4 и 5 приведены полученные зависимости.

Как и ожидалось, при выращивании твердых растворов  $Ga_{1-x}In_xN$  в области высоких температур не удастся получить содержание InN больше 0,4 моль.долей. При снижении температуры роста до 600 °С заметно улучшаются условия вхождения In в твердый раствор и удастся увеличить концентрацию InN до 0,9 моль.долей. При выращивании твердых растворов GaAlN в широком диапазоне температур удастся уверенно получать твердые растворы с содержанием AlN от 0,1 до 0,9 моль.долей. Таким образом, рекомендуется при выращивании слоев  $Ga_{1-x}In_xN$  управлять составом твердых растворов путем изменения температуры, а для  $Ga_{1-x}Al_xN$  – изменяя состав газовой фазы на входе в реактор.



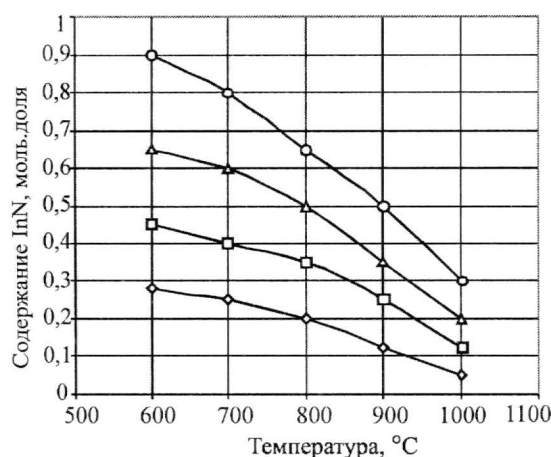


Рис. 4. Изменение состава твердого раствора GaInN от температуры при различной концентрации МОС In в газовой фазе:  $\diamond$  – 0,3;  $\square$  – 0,5;  $\Delta$  – 0,7;  $\circ$  – 0,9

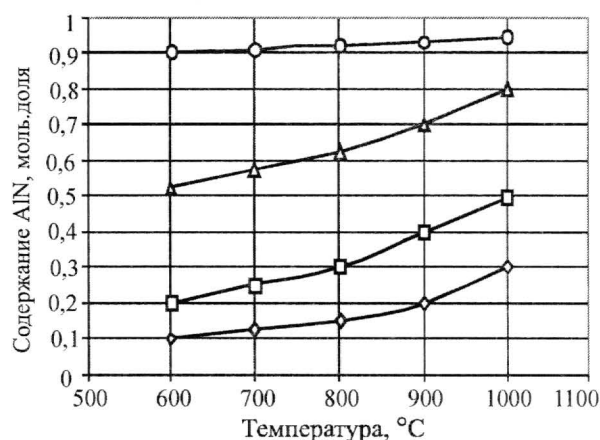


Рис. 5. Влияние температуры на состав твердого раствора GaAlN при различной концентрации МОС Al в газовой фазе:  $\diamond$  – 0,1;  $\square$  – 0,2;  $\Delta$  – 0,5;  $\circ$  – 0,9

**Эффективность излучения гетероструктур.** При формировании функциональных гетероструктур на основе GaN используют чередование материалов (твердых растворов) с различной шириной запрещенной зоны. Для оптоэлектроники это GaN/GaInN/GaN, для СВЧ-техники – GaN/GaAlN/GaN. При этом использованы физические принципы, ранее разработанные при создании приборов на основе гетеропереходов с тонкими активными слоями. В соответствии с этими принципами в сверхтонких слоях сказываются эффекты размерного квантования – зависимости энергетического спектра электронов и дырок от толщины слоя, когда последняя сравнима с длиной волны де Бройля. Таким образом, открылась возможность регулировать цвет свечения, изменяя не состав полупроводника, а толщину потенциальной ямы, называемой в этих условиях квантовой ямой. В структуре с одной квантовой ямой в качестве широкозонных слоев используются GaN и твердые растворы  $Ga_{1-x}Al_xN$ , в качестве активной области (квантовой ямы) – узкозонный твердый раствор  $Ga_{1-x}In_xN$  [5]. Структуры с одной квантовой ямой, имея лучшие характеристики по сравнению с обычным гетеропереходом, не позволяют в полной мере реализовать все потенциальные возможности GaN и его твердых растворов. Поэтому следующий шаг по улучшению функциональных характеристик излучателей на GaN – разработка гетероструктур с множественными квантовыми ямами (МКЯ). В данном случае активной областью излучателя является сверхрешетка, состоящая из тонких слоев (толщиной 2–4 нм) материалов с различной шириной запрещенной зоны.

Гетероструктуры для светодиода с МКЯ представляют собой довольно сложный «пирог». На сапфировой подложке после буферного слоя AlN (толщиной 30 нм) выращен относительно толстый (4 мкм) слой  $n$ -GaN:Si. Затем следует активный нелегированный слой, состоящий из пяти чередующихся квантовых ям  $In_xGa_{1-x}N$  (3–4 нм) и барьеров GaN (4–5 нм). Эффективная ширина запрещенной зоны квантовой ямы  $In_xGa_{1-x}N$  соответствует излучению от голубой до желтой области (450–580 нм), если состав активного слоя меняется в пределах  $x = 0,2–0,4$ . Кроме этого, она зависит и от толщины квантовой ямы. Расположенный выше барьерный широкозонный слой  $p$ -Al<sub>0,1</sub>Ga<sub>0,9</sub>N:Mg (100 нм) инжектирует дырки и согласует решетку с решеткой верхнего слоя  $p$ -GaN:Mg (0,5 мкм), на который нанесен металлический контакт Ni–Au. Второй металлический контакт (Ti–Al) с нижним слоем  $n$ -GaN создается после травли части структуры.

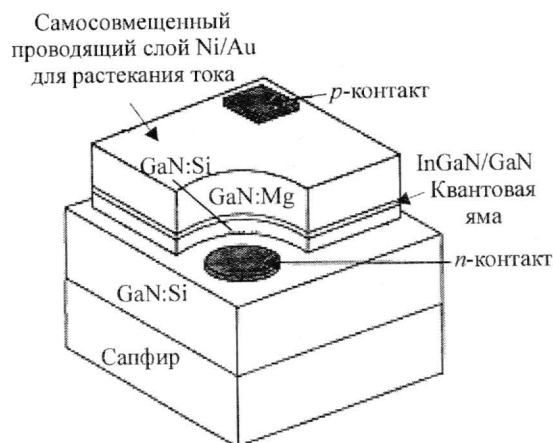


Рис.6. Схема тестового элемента излучающего кристалла на основе GaN

Для гетеро- $p$ - $n$ -перехода ток при прямом смещении определяется выражением

$$I = I_{\text{обр}} \left[ \exp\left(\frac{qU}{\beta kT}\right) - 1 \right],$$

где  $\beta$  – коэффициент неидеальности, учитывающий генерационно-рекомбинационные процессы в области объемного заряда (область квантовых ям). Эти процессы связаны с тем, что на границе перехода из-за различия параметров решетки, коэффициентов линейного расширения квантовых ям и барьеров, прорастания дислокаций из буферного слоя возникает большое количество центров безызлучательной рекомбинации. Они снижают ток при прямом смещении. В приборе это приводит к браку по прямому напряжению при рабочих токах.

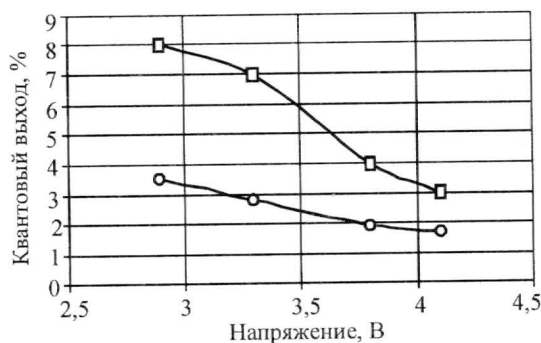


Рис.7. Изменение внешнего квантового выхода гетероструктур на основе GaN с квантовыми ямами при изменении прямого напряжения для разных  $\beta$  (обратный ток 10 мкА, прямой ток 20 мА):  $\square$  – 3;  $\circ$  – 4

Излучательная способность гетероструктур определяется условиями инжекции и внутренним квантовым выходом. Условия сверхинжекции в изучаемой гетероструктуре создаются формированием перехода  $p$ -AlGaIn/ $n$ -InGaIn. Внутренний квантовый выход определяется временами жизни инжектированных носителей при излучательной рекомбинации и безызлучательной рекомбинации на дефектах структуры.

В настоящей работе излучательные характеристики изучались путем оптимизации  $U$ - $I$ -характеристик тестовых элементов. На рис.6 приведен один из вариантов конструкции излучающего кристалла (чипа) для СИД голубого свечения.

Улучшение излучательных характеристик связано со снижением вклада процессов генерации и рекомбинации неосновных носителей заряда ( $I_{\text{обр}}$ ) и повышением вклада излучательной рекомбинации основных носителей (уменьшение  $\beta$ ). Был проведен целый комплекс технологических мероприятий по снижению уровня неконтролируемого легирования и повышению структурного совершенства гетеропереходов с множественными квантовыми ямами. В процессе оптимизации контролировались  $U$ - $I$ -характеристики и определялся внешний квантовый выход. На рис.7 приведена зависимость внешнего квантового выхода от прямого падения напряжения при постоянном токе для различных  $\beta$ .

Использование гетероструктур с множественными квантовыми ямами позволяет:

- увеличить рабочий ток излучателя, а значит и эффективность за счет последовательного заполнения квазиуровней всех квантовых ям;
- отодвинуть активную область, в которой происходит рекомбинация, от дефектного буферного слоя, что уменьшает вероятность безызлучательной рекомбинации на дефектах и способствует увеличению вероятности и эффективности излучательной рекомбинации;
- снизить поляризационные поля в гетероструктуре, что также приводит к увеличению внутреннего квантового выхода;



- улучшить условия для технологической стабилизации излучательных характеристик за счет размывания энергетической структуры в множественных квантовых ямах;
- путем модулированного легирования повысить вероятность излучательной рекомбинации и, соответственно, улучшить функциональные характеристики излучателей.

На основе гетероструктур голубого свечения изготавливались белые излучатели. Для этого использовались люминофоры, преобразующие голубой свет в желтый. На рис.8 показан спектр белого СИД, изготовленного с использованием желтого люминофора на поверхности кристалла. Кривая на рисунке имеет спектральные максимумы 450 и 582 нм, что соответствует координатам белого цвета ( $X = 0,311$ ,  $Y = 0,342$ ); люмен-эквивалент этого излучения  $Q = 240\text{--}250$  лм/Вт, а светоотдача  $\eta_e = 10$  лм/Вт.

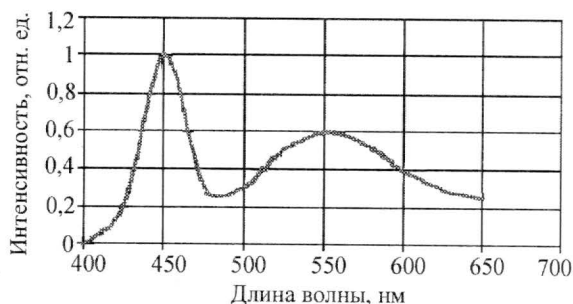


Рис.8. Спектр белого СИД с люминофором

Большинство последующих решений предполагает создание белого СИД с более высоким индексом цветопередачи (до 87 единиц) и существенно большей светоотдачей (более 20 лм/Вт). Применение различных люминофоров и вариации максимума в спектре СИД позволят перекрыть почти весь диапазон цветовых температур от 2850 до 8000 К с эффективностью, сравнимой с лампами накаливания.

Дальнейшее улучшение функциональных характеристик СИД на основе соединений  $A^{III}B^V$  связывают с реализацией современных идей по созданию новых квантово-размерных элементов в полупроводниках — квантовых «проволок» и квантовых «точек» [6].

### Литература

1. *Pearlton S.J., Zolper J.C., Shul R.J., Ren F.* GaN: Processing, detects and devices // J. of Appl. Ph. — 1999. — Vol. 86, N 1. — P. 1–78.
2. *Алферов Ж.И.* История и будущее полупроводниковых гетероструктур // ФТП. — 1998. — Т. 32, № 1. — С. 3–18.
3. *Акчури Р.Х.* МОС-гидридная эпитаксия: Современное состояние и основные тенденции развития // Материалы электронной техники. — 1999. — № 2. — С. 4–12.
4. *Jain S.C., Willander M., Narayan J.* III-nitrides: Growth, characterization and properties // J. of Appl. Ph. — 2000. — Vol. 87, N 3. — P. 965–1006.
5. Effects of silicon doping on the nanostructures of InGaN/GaN quantum wells / *Meng-Ku Chen, Yung-Chen Cheng, Jiu-Yang Chen et al.* // J. of Crystal Growth. — 2005. — 15 May. — Vol. 279, Issues 1–2. — P. 55–64.
6. GaN:δ-Mg grown by MOVPE: Structural properties and their effect on the electronic and optical behavior / *T. Li, C. Simbrunner, M. Wegscheider, A. Navarro-Quezada et al.* // J. of Crystal Growth. — 2008. — 4 January. — Vol. 310, Issue 1. — P. 13–21.

Статья поступила  
29 ноября 2007 г.

**Вигдорович Евгений Наумович** — доктор технических наук, профессор кафедры инновационных технологий приборостроения МГУПИ. *Область научных интересов:* материаловедение и технология полупроводников.

**Свешиников Юрий Николаевич** — кандидат технических наук, главный научный сотрудник ЗАО «Элма-Малахит» (г. Москва). *Область научных интересов:* материаловедение и технология полупроводников.

# МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.382.049.77

## Фотоэлектрические процессы в пятидиодной вертикально интегрированной спектрально-селективной фотоячейке

*В.И.Хайновский, Е.А.Игнатьева, В.В.Уздовский*

Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)

Исследованы распределения электрического потенциала в толще пятидиодной вертикально интегрированной фотоприемной структуры. Получены спектральные характеристики фоточувствительностей в пяти областях различного типа проводимости. Для указанных областей найдены времена фоторелаксации.

Разработка спектрально-матричных фотоприемников высокой степени интеграции на основе вертикально совмещенных диодных структур является в настоящее время актуальной задачей. Данный класс интегральных фотоприемных устройств видимого диапазона необходим для усовершенствования систем приема изображения и улучшения параметров по распознаванию цели. В работах [1, 2] представлены результаты детального анализа конструктивных параметров, управляющих электрических напряжений и фотоэлектрических характеристик фоточувствительной трехдиодной ячейки спектрально-матричного фотоприемника.

Спектрально-матричный фотоприемник фирмы Foveon, основанный на трех вертикально интегрированных  $p$ - $n$ -переходах, обладает сравнительно малыми по площади фоточувствительными элементами разложения оптического изображения и достаточно высокой степенью их интеграции на одном кристалле с учетом разложения изображения на три оптических диапазона длин волн (синий, зеленый, красный) [3]. По своим конструктивным параметрам и фотоэлектрическим характеристикам он не уступает и даже превосходит известные спектрально-матричные фотоэлектрические преобразователи изображений на основе приборов с зарядовой связью [4–9].

**Расчет распределения электрического потенциала в толще структуры и времени терморелаксации пятидиодной фотоячейки.** С целью увеличения селективности разложения белого света на спектральные диапазоны длин волн возможно применение конструкции фотоячейки, включающей в себя пять вертикально соединенных фотодиодов. При этом имеется пять  $p$ - $n$ -переходов с расположением их металлургических границ от поверхности на расстояниях: 0,2; 0,7; 1,2; 1,7; 2,5 мкм. Вертикальная структура содержит три  $n$ -области, две  $p$ -области и  $p$ -подложку. К каждой области (и подложке) имеется отдельный металлический контакт, с помощью которого можно выводить соответствующий фотосигнал. Толщины полупроводниковых областей выбраны из соображений выделения пяти отдельных спектральных диапазонов длин волн



оптического излучения. На рис.1 изображена рассматриваемая структура фотоячейки в вертикальном разрезе. Она может быть изготовлена по стандартной КМОП-технологии, включающей в себя ионные имплантации соответствующих легирующих примесей атомов (ионов) фосфора, бора с последующими их «отжигами» для создания последовательно вложенных одна в другую  $n$ - и  $p$ -областей. Для создания  $p$ - $n$ -переходов концентрации соответствующих легирующих примесей увеличиваются

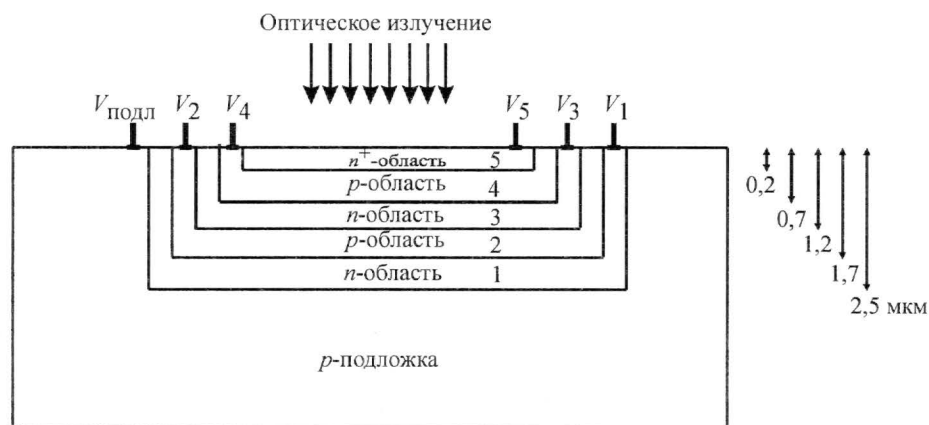


Рис.1. Схематический разрез фоточувствительной ячейки, содержащей пять вертикально интегрированных  $p$ - $n$ -переходов ( $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5$  – управляющие напряжения)

в 10 раз (для перекомпенсации предыдущей примеси) и равны соответственно: в глубокой  $n$ -области 1 –  $N_d^{(1)} = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , в  $p$ -области 2 над ней –  $N_a^{(2)} = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , в средней  $n$ -области 3 –  $N_d^{(2)} = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , в  $p$ -области 4 над ней –  $N_a^{(4)} = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и приповерхностной  $n$ -области 5 –  $N_d^{(3)} = 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Концентрация легирующей примеси в  $p$ -подложке –  $N_a^{(1)} = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . С увеличением концентрации примесей в  $n$ - и  $p$ -областях существенно уменьшаются соответствующие ОПЗ  $p$ - $n$ -переходов и, следовательно, возрастают внутренние электрические поля. Для устранения превышения электрического поля ОПЗ критического значения ( $3 \cdot 10^5 \text{ В/см}$ ) в двух приповерхностных  $p$ - $n$ -переходах выбраны меньшие концентрации легирующих примесей. Для этого предпоследнюю (к поверхности)  $p$ -область можно создать травлением предыдущей  $n$ -области на глубину 0,7 мкм с последующим заполнением вытравленной толщины кремнием  $p$ -типа методом эпитаксиального наращивания. Приповерхностная  $n$ -область глубиной 0,2 мкм выполняется традиционным образом ионной имплантацией.

Электронные схемы считывания фотосигналов из каждой  $n$ - и  $p$ -области фотоячейки выполняются в прилегающих к ее фоточувствительной части  $p^+$ -областях шириной 2 мкм (рис.2). На рисунке дан вид сверху (в плане) на фотоячейку, изображенную в масштабе с топологическими размерами, соответствующими субмикронным размерам фотоячейки с тремя  $p$ - $n$ -переходами. Каждая схема считывания фотосигнала содержит МОП-транзистор установки соответствующего напряжения обеднения на  $n$ - или  $p$ -область, затем усилительный МОП-транзистор и МОП-транзистор, предназначенный для считывания фотосигнала на шину разряда. Схемотехническая организация управления фотоячейкой содержит пять «шин строк» для считывания фотосигналов пяти спектральных диапазонов длин волн и одну «шину разряда».

Распределение электрического потенциала в пятидиодной фотоячейке можно получить аналитическим решением уравнения Пуассона для каждой области пространственного заряда. На рис.3 представлено одномерное распределение электрического потенциала в полупроводниковой толще структуры фотоячейки в соответствии с толщинами слоев согласно рис.1 и выбранными концентрациями легирующих примесей в них. При этом на  $n$ - и  $p$ -области поданы обедняющие их напряжения: на  $n$ -области –  $V_1 = V_3 = V_5 = +1,5$  В, а на  $p$ -области –  $V_2 = V_4 = -1,0$  В. Данные рис.3 получены в результате численного эксперимента на ЭВМ с помощью программы САПР ISE TCAD.

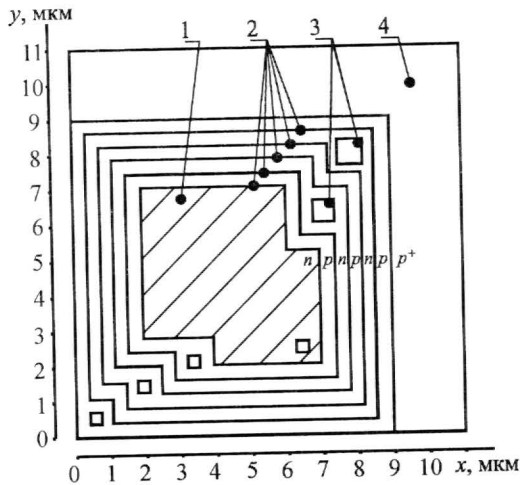


Рис.2. Планарная топология основных конструктивных элементов фотоячейки с пятью фотодиодами: 1 – фоточувствительная поверхность фотоячейки; 2 – металлургические границы  $p$ - $n$ -переходов; 3 – контактные окна; 4 –  $p^+$ -область для МДП-транзисторов схем считывания фотосигналов

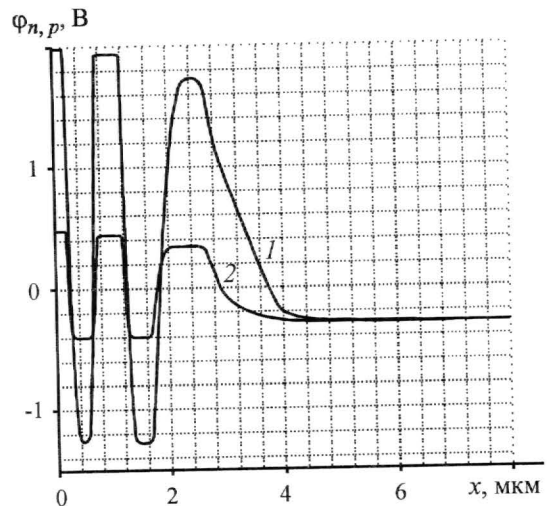


Рис.3. Распределение электрического потенциала в пятидиодной вертикальной фотоячейке: 1 – начальное стационарное обедненное состояние  $n$ - и  $p$ -областей (управляющие напряжения равны:  $V_1 = V_3 = V_5 = +1,5$  В;  $V_2 = V_4 = -1,0$  В); 2 – равновесное состояние (соответствующие управляющие напряжения равны:  $V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = V_5 = 0$ )

По изменению толщин электронейтральных областей и соответствующих концентраций легирующих примесей в них были рассчитаны максимальные величины фотоносителей, собираемых в каждой «потенциальной яме», а именно:

- в глубокой  $n$ -области 1 –  $\Delta Q_{n1 \text{ фот}} = 2,62 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ;
- в  $p$ -области 2 –  $\Delta Q_{p1 \text{ фот}} = 8,2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ;
- в средней  $n$ -области 3 –  $\Delta Q_{n2 \text{ фот}} = 18,4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ;
- в средней  $p$ -области 4 –  $\Delta Q_{p2 \text{ фот}} = 13,85 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ;
- в приповерхностной  $n$ -области 5 –  $\Delta Q_{n3 \text{ фот}} = 9,64 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ .

Расчет времен терморелаксации  $n$ - и  $p$ -областей выполнялся по формуле

$$T_{\text{терм}}^{n,p} = \frac{e \cdot \Delta Q_{n,p \text{ фот}}}{j_{n,p \text{ терм}}} \quad (1)$$

Значения плотностей термотоксов в рассматриваемых  $n$ - и  $p$ -областях структуры получены с помощью расчета на ЭВМ и соответственно равны 2,3; 6,4; 4,6; 10,0; 3,3 мкА/см<sup>2</sup>. Поэтому согласно выражению (1) времена терморелаксации  $n$ - и

$p$ -областей равны:  $T_{\text{терм}}^{n1} = 0,018$  с;  $T_{\text{терм}}^{p1} = 0,021$  с;  $T_{\text{терм}}^{n2} = 0,063$  с;  $T_{\text{терм}}^{p2} = 0,022$  с и  $T_{\text{терм}}^{n3} = 0,047$  с. В качестве общего времени терморелаксации всей структуры выберем наименьшее из указанных времен (0,018 с). Тогда время цикла (одного периода) управления фотоячейкой  $T_{\text{цикл}} = 0,001 \cdot T_{\text{терм}} = 18$  мкс, а соответствующая частота цикла управления фотоячейкой  $f_{\text{цикл}} = \frac{1}{T_{\text{цикл}}} = \frac{1}{18 \text{ мкс}} = 56$  кГц. Полученные величины сравнимы с аналогичными для вертикальной трехдиодной фотоячейки [1].

**Расчет фотоэлектрических характеристик вертикальной фотоячейки с пятью диодами.** При регистрации оптического излучения все пять фотодиодов фотоячейки (под влиянием внешних обедняющих напряжений) работают в фотодиодном режиме. Поэтому для записи уравнений фоторелаксации  $n$ - и  $p$ -областей структуры воспользуемся схематическим распределением ОПЗ и толщин электронейтральных областей в них согласно рис.4. Тогда получим следующие уравнения фоторелаксации:

- в глубокой  $n$ -области 1:

$$\frac{dQ_n^{(1)}}{dt} = B \cdot \exp\left(-\int_{x_p^{(1)}}^L \alpha(x) dx\right) \left[1 - \exp\left(-\int_{-w}^{x_p^{(1)}} \alpha(x) dx\right)\right]; \quad (2)$$

- в глубокой  $p$ -области 1:

$$\frac{dQ_p^{(1)}}{dt} = B \cdot \exp\left(-\int_{x_n^{(2)}}^L \alpha(x) dx\right) \left[1 - \exp\left(-\int_{\tilde{x}_n^{(1)}}^{x_n^{(2)}} \alpha(x) dx\right)\right]; \quad (3)$$

- в средней  $n$ -области 2:

$$\frac{dQ_n^{(2)}}{dt} = B \cdot \exp\left(-\int_{x_p^{(2)}}^L \alpha(x) dx\right) \left[1 - \exp\left(-\int_{\tilde{x}_p^{(1)}}^{x_p^{(2)}} \alpha(x) dx\right)\right]; \quad (4)$$

- в средней  $p$ -области 2:

$$\frac{dQ_p^{(2)}}{dt} = B \cdot \exp\left(-\int_{x_n^{(3)}}^L \alpha(x) dx\right) \left[1 - \exp\left(-\int_{\tilde{x}_n^{(2)}}^{x_n^{(3)}} \alpha(x) dx\right)\right]; \quad (5)$$

- в приповерхностной  $n$ -области 3:

$$\frac{dQ_n^{(3)}}{dt} = B \cdot \left[1 - \exp\left(-\int_{\tilde{x}_p^{(2)}}^L \alpha(x) dx\right)\right], \quad (6)$$

где  $B = \frac{P}{E}$ ;  $P$  – освещенность поверхности фотоячейки;  $E = \frac{hc}{\lambda}$  – энергия кванта света.

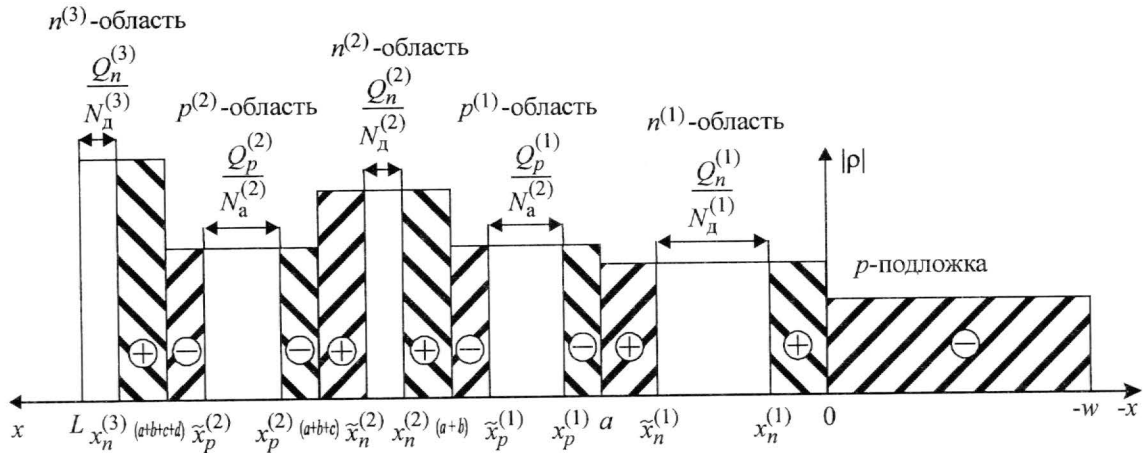


Рис.4. Схематическое распределение объемных зарядов ионизованных легирующих примесей на границах  $p$ - $n$ -переходов в стационарном состоянии

В уравнениях (2)–(6) (согласно рис.4) учитываются толщины  $n$ - и  $p$ -областей, концентрации легирующих примесей в них, а также, что  $L = a + b + c + d + l$ ;  $x_n^{(1)} = \alpha \cdot w$ ;  
 $\tilde{x}_n^{(1)} = x_n^{(1)} + \frac{Q_n^{(1)}}{N_d^{(1)}}$ ;  $x_p^{(1)} = a + \beta \cdot (a - \tilde{x}_n^{(1)})$ ;  $\tilde{x}_p^{(1)} = x_p^{(1)} + \frac{Q_p^{(1)}}{N_a^{(1)}}$ ;  $x_n^{(2)} = (a + b) + \gamma \cdot [(a + b) - \tilde{x}_p^{(1)}]$ ;  
 $\tilde{x}_n^{(2)} = x_n^{(2)} + \frac{Q_n^{(2)}}{N_d^{(2)}}$ ;  $x_p^{(2)} = (a + b + c) + \theta \cdot [(a + b + c) - \tilde{x}_n^{(2)}]$ ;  $\tilde{x}_p^{(2)} = x_p^{(2)} + \frac{Q_p^{(2)}}{N_a^{(2)}}$ ;  $x_n^{(3)} =$   
 $= (a + b + c + d) + \eta \cdot [(a + b + c + d) - \tilde{x}_p^{(2)}]$ ;  $\tilde{x}_n^{(3)} = a + b + c + d + l = L$  — общая толщина  
 структуры;  $\tilde{x}_n^{(3)} = x_n^{(3)} + \frac{Q_n^{(3)}}{N_d^{(3)}}$ . Причем  $\alpha = \frac{N_{\text{подл}}}{N_d^{(1)}}$ ;  $\beta = \frac{N_d^{(1)}}{N_a^{(1)}}$ ;  $\gamma = \frac{N_a^{(1)}}{N_d^{(2)}}$ ;  $\theta = \frac{N_d^{(2)}}{N_a^{(2)}}$ ;  $\eta = \frac{N_a^{(2)}}{N_d^{(3)}}$ .

Численное решение системы уравнений (2)–(6) дает зависимости во времени поверхностных концентраций фотоносителей в  $n$ - и  $p$ -областях, которые имеют линейный характер до полного заполнения «потенциальных ям» этих областей. Также численно рассчитаны значения фототоков, считываемых из рассматриваемых  $n$ - и  $p$ -областей в рабочем режиме в случае освещения фоточувствительной поверхности фотоячейки ( $4,5 \times 4,5$  мкм) световым потоком, создающим освещенность  $P = 3$  Вт/см<sup>2</sup> в течение времени освещения  $\tau_{\text{фот}} = 30$  нс в диапазоне длины волн 0,4–1,0 мкм. На основании этих данных построены спектральные характеристики фоточувствительности каждой  $n$ -области структуры рассматриваемой фотоячейки, которые представлены на рис.5,а. Эти зависимости показывают, что максимумы спектральных фоточувствительностей  $n$ -областей соответствуют следующим длинам волн: для приповерхностной  $n$ -области 5 —  $\lambda_{\text{max}} = 0,4$  мкм, для средней  $n$ -области 3 —  $\lambda_{\text{max}} = 0,52 - 0,55$  мкм, для глубокой  $n$ -области 1 —  $\lambda_{\text{max}} = 0,68 - 0,72$  мкм. Сравнение со спектральными характеристиками фоточувствительностей  $n$ - и  $p$ -областей трехдиодной фотоячейки [1, 2] показывает, что предложенная фотоячейка с пятью вертикально интегрированными фотодиодами проявляет большую селективность в разделении оптического диапазона длин волн на три спектральные области: синюю, зеленую и красную. Кроме того, наличие еще двух дополнительных фотосигналов, считываемых из двух  $p$ -областей дает еще два дополни-



тельных спектральных диапазона с максимумами, соответствующими длинам волн:  $\lambda_{\max} = 0,46$  мкм и  $\lambda_{\max} = 0,6$  мкм (рис.5,б). Указанные особенности пятидиодной фотоячейки расширяют ее применение в качестве спектрального фотоприемника для систем технического зрения.

Расчет максимально допустимых времен фоторелаксации (накопления фотозарядов) выполнен с помощью выражения:

$$\tau_{\text{фот max}} = \frac{e \cdot \Delta Q_{n,p \text{ фот}} \cdot S_{\text{яч. фот}}}{I_{n,p \text{ фот}}},$$

где  $S_{\text{яч. фот}}$  — площадь фотоячейки.

Используя данные по фототокам, полученным в результате численного расчета на ЭВМ, построены зависимости максимальных времен фоторелаксации для каждой  $n$ - и  $p$ -области пятидиодной фотоячейки, которые представлены на рис.6. Наименьшие значения указанных максимальных времен фоторелаксации наблюдаются в диапазонах длин волн наибольших фоточувствительностей  $n$ - и  $p$ -областей и составляют 44; 222; 446; 167; 132 нс соответственно для областей  $n1$ ,  $p1$ ,  $n2$ ,  $p2$ ,  $n3$ . Вне диапазонов максимальных фоточувствительностей времена фоторелаксаций существенно возрастают.

Таким образом, проведенный анализ конструктивных параметров, амплитуд управляющих напряжений, фотоэлектрических характеристик вертикально интегрированной пятидиодной фотоячейки показал возможность создания на ее основе спектрального фотоэлектрического преобразователя изображений с высокой селективностью выделения пяти оптических диапазонов длин волн. Это делает перспективным его применение в системах технического зрения.

Предложенная вертикально интегрированная фотоячейка с пятью диодами ( $p$ - $n$ -переходами) позволила улучшить разделение спектральных характеристик фоточувствительностей по длинам волн и расширить функциональные возможности фотоэлектрических преобразователей изображений. Установлено, что для электрической схемы считывания фотосигналов из каждой  $n$ - или  $p$ -области необходимо три МОП- $n$ -канальных субмикронных транзистора. При мини-

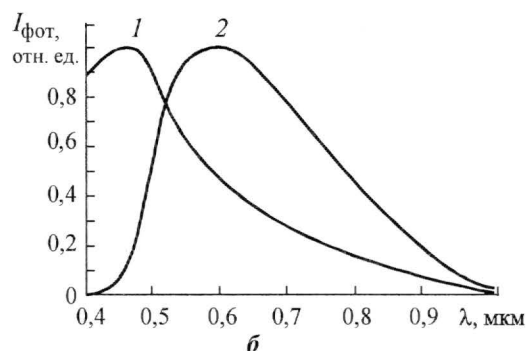
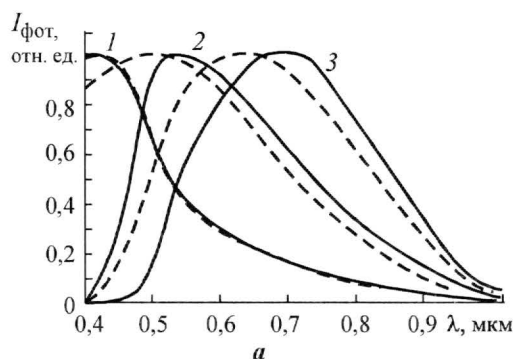


Рис.5. Спектральные характеристики фоточувствительностей пятидиодной фотоячейки: 1 — приповерхностная  $n$ -область; 2 — средняя  $n$ -область; 3 — глубокая  $n$ -область (сплошные линии). Пунктиром указаны спектральные характеристики фоточувствительностей  $n$ - и  $p$ -областей трехдиодной фотоячейки (а); 1 — средняя  $p$ -область; 2 — глубокая  $p$ -область (б)

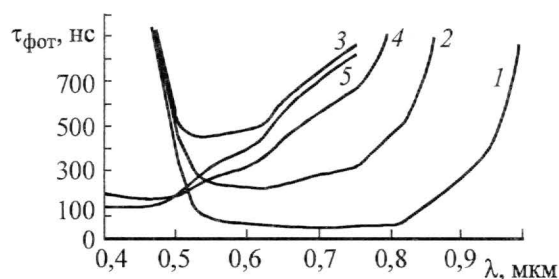


Рис.6. Зависимости максимальных времен фоторелаксации обедненных областей  $p$ - $n$ -переходов пятидиодной фотоячейки от длины волны поглощаемого оптического излучения: 1 — глубокая  $n1$ ; 2 — глубокая  $p1$ ; 3 — средняя  $n2$ ; 4 — средняя  $p2$ ; 5 — приповерхностная  $n3$  ( $P = 3$  Вт/см<sup>2</sup>)

мальном топологическом размере 0,35 мкм полная площадь фотоячейки равна  $11 \times 11$  мкм, а коэффициент ее заполнения фоточувствительной частью площадью  $5 \times 5$  мкм соответствует 21%.

### Литература

1. **Игнатьева Е.А., Уздовский В.В., Хайновский В.И.** Расчет конструктивных параметров и электрического потенциала трехдиодной вертикально интегрированной спектрально-селективной фотоячейки // Изв. вузов. Электроника. – 2008. – № 1. – С. 35–42.
2. **Игнатьева Е.А., Уздовский В.В., Хайновский В.И.** Анализ процессов фоторелаксации и фотоэлектрических характеристик трехдиодной вертикально интегрированной спектрально-селективной фотоячейки // Изв. вузов. Электроника. – 2008. – № 3. – С. 38–44.
3. US Pat. № 5,969,875, Int.Cl. G01J 3/50, U.S.Cl. 250/226, Color Separation in an Active Pixel Cell Imaging Array Using a Triple-Well-Structure /**Merrill R.B.** – 12 Oct. – 1999.
4. **Barsan R.** Characteristics of the Overlaid Charge-Coupled Device // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1979. – Vol. ED-26, № 2. – P. 123–131.
5. **Khainovskii V.I., Uzдовskii V.V.** Theoretical and experimental study of photoelectric characteristics of the two-channel bulk charge-coupled device // Optical Engineering. – 1994. – Vol.33, № 7, July. – P. 2352–2356.
6. **Khainovskii V.I., Uzдовskii V.V.** Photoelectrical characteristics of the spectrozonal two-channel bulk charge coupled device // Proc. 40<sup>th</sup> Int. Symp. Opt. Eng. Inst. (San Diego, California, USA, 13-14 July, 1995) Vol. 2551. – 1995. – P. 189–196.
7. **Khainovskii V.I., Uzдовskii V.V.** Numerical simulation of photoelectrical characteristics of the spectrozonal three-channel bulk charge coupled device // Optical Engineering. – 1997. – Vol.36, June. – P. 1678–1684.
8. **Хайновский В.И., Уздовский В.В., Гордо Н.М.** Многофункциональные спектрозональные фоточувствительные объемные приборы с зарядовой связью // Изв. вузов. Электроника. – 1999. – № 3. – С. 45–51.
9. **Хайновский В.И., Уздовский В.В., Гордо Н.М., Федоров Р.А.** Моделирование процессов фоторелаксации в многоканальных объемных фоточувствительных приборах с зарядовой связью // Изв. вузов. Электроника. – 2000. – № 1. – С. 28–35.

Статья поступила  
13 сентября 2007 г.

**Хайновский Владимир Иванович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики Ставропольского государственного университета. *Область научных интересов:* физика полупроводников, структуры металл–диэлектрик–полупроводник, приборы с зарядовой связью.

**Игнатьева Елена Александровна** – аспирант кафедры общей физики МИЭТ. *Область научных интересов:* физика полупроводников, моделирование фотоэлектрических процессов в фотоприемных структурах.

**Уздовский Валерий Владимирович** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики МИЭТ. *Область научных интересов:* физика полупроводников, фотоэлектрические процессы в объемных каналах фотоприемников.

## Инжекционные фотодиоды на основе низкоомных монокристаллов ZnS

В.В.Лосев

Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)

Представлены результаты экспериментального исследования фотодиодных структур  $Ni-n-n^+-In$ , изготовленных из низкоомного кристалла  $ZnS:Al$  ( $n^+$ -область). Высокоомный компенсированный  $n$ -слой получен термодиффузией серебра. Фотодиоды обладают инжекционным усилением фототока при прямом смещении 1–10 В. Выявлены закономерности изменения токов через диоды от толщины  $n$ -слоя в темноте и при УФ-освещении. Фоточувствительность максимальна в области собственного поглощения в узкой спектральной полосе.

Монокристаллы сульфида цинка ZnS относятся к широкозонным полупроводниковым соединениям  $A^{II}B^{VI}$  с шириной запрещенной зоны 3,7 эВ. Интерес к этим полупроводникам обусловлен перспективой широкого использования их в качестве исходного материала для создания источников и приемников излучения при освоении коротковолновой видимой и УФ-областей спектра [1–3].

Фотодиоды с высокой чувствительностью к ультрафиолетовому излучению (330–380 нм) на основе высокоомного ZnS реализованы в [2]. Фотодиоды изготовлены из высокоомных монокристаллов ZnS с удельным сопротивлением в темноте порядка  $10^{13}$  Ом·см. Диоды имели структуру  $Ag-ZnS:Ag-ZnS-In$ . При прямом включении они обладали интегральной токовой фоточувствительностью, равной 1,5 А/Вт (что на порядок больше, чем при обратном включении), при мощности падающего УФ-излучения 0,1–10 мкВт/см<sup>2</sup>.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования фотодиодов, изготовленных из низкоомных монокристаллов ZnS с удельным темновым сопротивлением  $10^3 - 10^4$  Ом·см. Исходные монокристаллы  $n^+$ -типа легированы алюминием в процессе выращивания. Алюминий при замещении атомов цинка является донором и образует примесные уровни в запрещенной зоне с энергией 0,15–0,25 эВ от края зоны проводимости [1].

С одной стороны полупроводниковой пластины толщиной 500 мкм, прошедшей операцию механической и химической полировки, формировался высокоомный слой  $n$ -типа путем термодиффузии серебра в атмосфере аргона. Серебро является акцепторной примесью для ZnS при замещении атомов цинка с энергией 0,20–0,25 эВ от края валентной зоны [1]. Толщина  $d$  компенсированного высокоомного слоя  $ZnS:Al:Ag$  в разных структурах составляла от 1,2 до 16 мкм и зависела от режимов термодиффузии. Удельное сопротивление  $n$ -области изменялось от  $10^9$  до  $10^{13}$  Ом·см. Параметры  $n$ -слоя определялись из частотных и  $CV$ -характеристик методом, сходным с тем, который описан в [4].

После процесса термодиффузии оставшееся серебро стравливалось и напылением в вакууме создавался контакт из полупрозрачной пленки никеля (Ni-контакт) с коэффициентом пропускания 20–30%. На обратной стороне пластинки формировался антизапорный контакт напылением индия с последующим вжиганием. В результате были изготовлены диодные структуры Ni– $n$ – $n^+$ –In, которые освещались через полупрозрачный никелевый слой площадью  $1 \text{ мм}^2$ . Кроме  $n^+$ -ZnS, в качестве исходных монокристаллов для изготовления таких же структур с площадью полупрозрачного контакта  $6,25 \text{ мм}^2$  использовался твердый раствор ZnS:CdS.

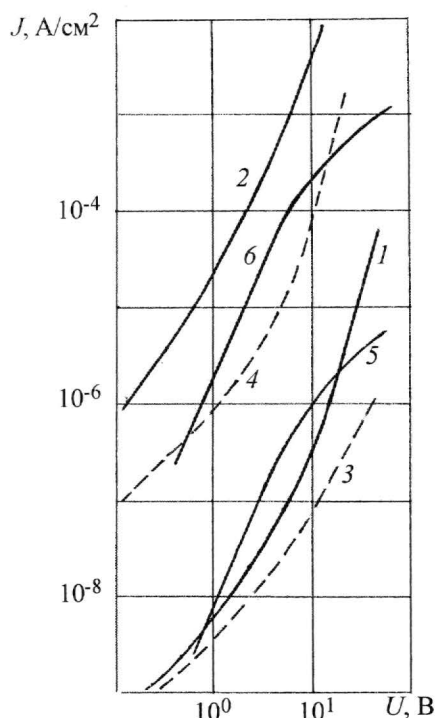


Рис.1. ВАХ диодов из ZnS (кривые 1–4) и ZnS:CdS (кривые 5, 6) в темноте (кривые 1, 3, 5) и при освещении (кривые 2, 4, 6). Интенсивность излучения  $1,6 \cdot 10^{-6} \text{ Вт/см}^2$ ,  $\lambda = 365 \text{ нм}$  (кривые 2, 4);  $10^{-6} \text{ Вт/см}^2$ ,  $\lambda = 500 \text{ нм}$

На рис.1 представлены ВАХ диода из ZnS с толщиной  $n$ -области  $d = 5 \text{ мкм}$  (кривые 1–4) и диода из ZnS:CdS (кривые 5,6) с толщиной  $n$ -области  $d = 11 \text{ мкм}$ . При малых напряжениях смещения диодов из ZnS в прямом направлении («+» источника питания на Ni-контакте) зависимость тока от напряжения близка к линейной (кривая 1,  $U < 1 \text{ В}$ ). В представлении ВАХ в виде  $J \sim U^n$ , где  $J$  – плотность тока, показатель степени  $n$  плавно увеличивается до 3,5 при повышении напряжения до 30 В. Темновые токи при обратном смещении (кривая 3) меньше, чем при прямом смещении. При монохроматическом освещении ( $\lambda = 365 \text{ нм}$ , интенсивность  $1,6 \cdot 10^{-6} \text{ Вт/см}^2$ ) токи через диод при прямом смещении увеличиваются на 3 порядка и более, а показатель степени  $n$  изменяется от 1,4 до 2,6 в диапазоне напряжений от 0 до 10 В (кривая 2). Световые токи при обратном смещении более чем на порядок меньше прямых токов (кривая 4).

Подобные ВАХ наблюдались и для диодов из ZnS с толщиной  $n$ -области  $d = 3; 12; 16 \text{ мкм}$ , за исключением диодов с толщиной  $d = 1,2 \text{ мкм}$ . Для этих диодов максимальное значение  $n$  в темноте наблюдалось вблизи  $U = 1 \text{ В}$  и составляло 2,5–2,8. С увеличением напряжения показатель степени  $n$  уменьшился до  $n \approx 1$  при  $U = 10 \text{ В}$ . Темновые токи находились в пределах от  $10^{-7}$  до  $10^{-2} \text{ А/см}^2$  при  $U = 30 \text{ В}$ .

Прямые токи при освещении диодов с  $d = 1,2 \text{ мкм}$  в диапазоне напряжений от 0,1 до 10 В изменялись от  $10^{-4}$  до  $10^{-1} \text{ А/см}^2$ , а показатель степени плавно уменьшался от 2 до 1. Аналогичное поведение ВАХ наблюдалось для диодов из ZnS:CdS в темноте (см. рис.1, кривая 5) и при монохроматическом освещении ( $\lambda = 500 \text{ нм}$ ,  $10^{-6} \text{ Вт/см}^2$ , кривая 6).

На рис.2 показаны зависимости показателя степени  $n$  от толщины  $d$  высокоомной  $n$ -области вблизи напряжений 1 и 10 В в темноте (пунктирные кривые) и при освещении (сплошные кривые) диодов из ZnS. Важным параметром для фотодиодов является отношение токов при освещении  $J_{\text{св}}$  и в темноте  $J_{\text{т}}$ :  $J_{\text{св}}/J_{\text{т}} \sim U^{\Delta n}$ , где  $\Delta n$  – разность показателей степени при неизменном напряжении на диоде. Как видно из рис.2, отношение  $J_{\text{св}}/J_{\text{т}}$  максимально у диодов с  $d = 7\text{--}12 \text{ мкм}$ .



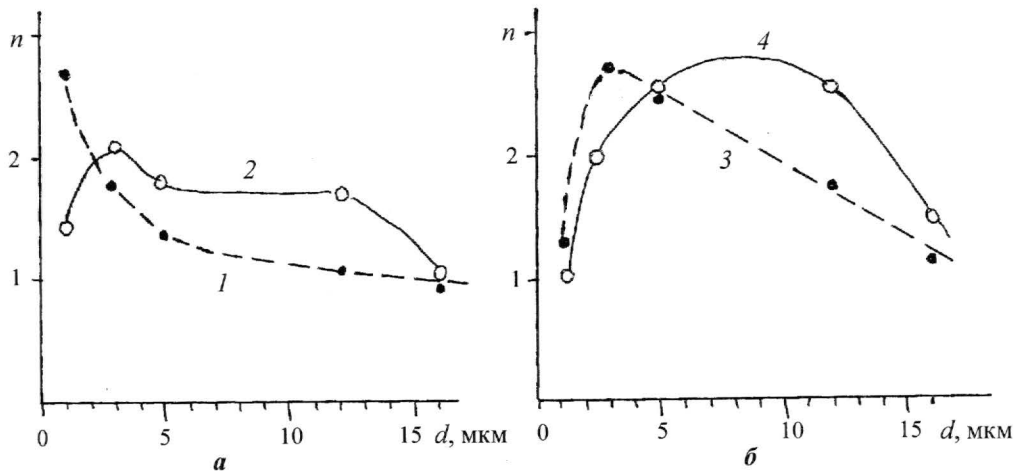


Рис.2. Зависимость показателя степени  $n$  от толщины  $d$   $n$ -ZnS-области диодов в представлении ВАХ в виде  $J \sim U^n$  в темноте (кривые 1, 3) и при освещении (кривые 2, 4):  $U = 1$  В (а);  $U = 10$  В (б)

Зависимости плотности тока через диод от толщины  $n$ -ZnS области при постоянном напряжении (в двойном логарифмическом масштабе) показаны на рис.3. Эти зависимости можно представить в виде  $J \sim d^{-m}$ .

Характерно, что для диодов в темноте показатели степени  $m$  для  $d < 5$  мкм существенно отличаются от значений для  $d > 5$  мкм. В то время как при освещении диодов  $m$  сохраняет свое значение при всех рассматриваемых толщинах  $d$ . На рис.3 значения  $m$  указаны рядом с аппроксимирующими прямыми. При прямом смещении при  $U = 10$  В (рис.3,б) значение  $m$  при освещении диодов меньше, чем в темноте. Для диодов в темноте с толщиной  $d \leq 5$  мкм при прямом смещении при  $U = 1$  В (прямая 1, рис.3,а) и  $U = 10$  В (прямая 4, рис.3,б) показатели степени  $m$  имеют одинаковое значение 5,6. Для диодов с толщиной  $d \geq 5$  мкм эти значения отличаются примерно в 2 раза ( $m = 3,3$  при  $U = 10$  В,  $m = 1,7$  при  $U = 1$  В).

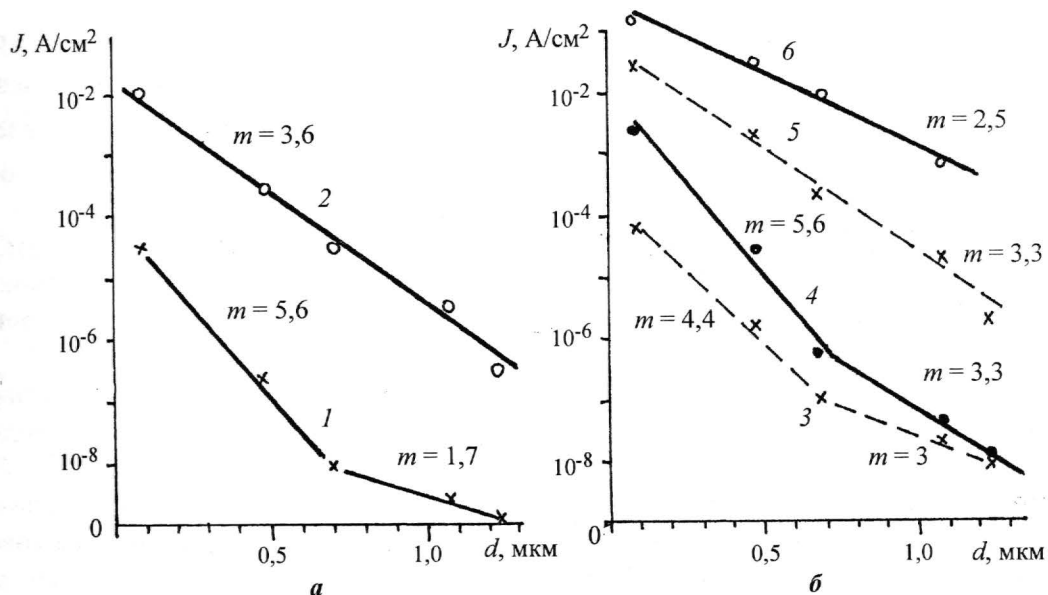


Рис.3. Зависимость плотности тока через диод от толщины  $n$ -ZnS области при прямом (сплошные линии) и обратном (пунктирные) смещении:  $U = 1$  В (а);  $U = 10$  В (б). Кривые 1, 3, 4 – в темноте; кривые 2, 5, 6 – при освещении ( $\lambda = 365$  нм, интенсивность  $1,6 \cdot 10^{-6}$  Вт/см²)

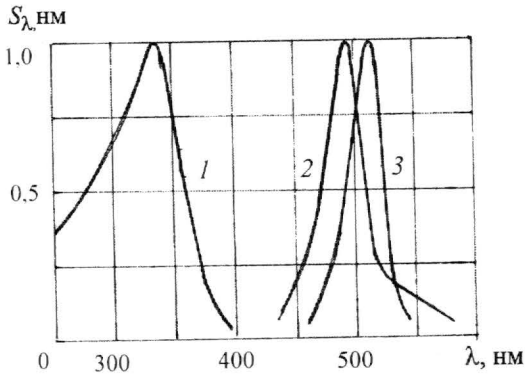


Рис.4. Спектры фоточувствительности диодов на основе низкоомных кристаллов ZnS (кривая 1), ZnS:CdS (кривая 2), CdS (кривая 3)

Спектры фоточувствительности диодов при прямом смещении представлены на рис.4, где для сравнения показан спектр подобных структур, изготовленных на основе CdS, использованных для контроля момента окончания сухого размерного травления слоя SiO<sub>2</sub> на кремнии в плазме CHF<sub>3</sub> [3].

Диоды в режиме продольного освещения (в направлении электрического поля) имеют резко селективный характер фоточувствительности. Токовая фоточувствительность диодов из ZnS в максимуме ( $\lambda = 335$  нм) достигала значений  $S_\lambda \sim 10^3$  А/Вт ( $d = 12$  мкм),  $10^4$  А/Вт ( $d = 5; 3$  мкм) при напряжениях до 10 В и плотности темновых токов  $3 \cdot 10^{-8}$  А/см<sup>2</sup> ( $d = 12$  мкм),  $5 \cdot 10^{-7}$  А/см<sup>2</sup> ( $d = 5$  мкм).

Таким образом, для фотодиодов Ni-n<sup>+</sup>-In на основе низкоомных монокристаллов ZnS, работающих при прямом смещении ( $U \leq 10$  В) в режиме продольного освещения через полупрозрачный Ni-контакт, оптимальная толщина n-области находится в пределах 7–12 мкм. При этих значениях кратность изменения тока  $J_{св}/J_T$  максимальна, а токовая фоточувствительность достигает  $10^4$  А/Вт при плотности темновых токов порядка  $10^{-8}$  А/см<sup>2</sup> и менее.

Использование твердых растворов ZnS:CdS для изготовления инжекционных фотодиодов позволит создавать высокочувствительные диодные структуры на любую заданную длину волны  $\lambda$  в существующем «окне» (см. рис.4) от 365 до 500 нм.

Внедрение Ag в ZnS сопровождается сильной зарядовой самокомпенсацией с активным участием собственных дефектов кристаллической решетки. Электрический заряд, накапливающийся на акцепторной примеси Ag, компенсируется не зарядом свободных дырок, а заряженными дефектами  $Z_i^+, V_S^+, V_S^{2+}, (Ag_{Zn}V_S)^+$ , где  $V_S$  – вакансии серы;  $Ag_{Zn}$  – атом серебра на месте атома Zn;  $Zn_i^+$  – междоузельный атом Zn. Кроме этих дефектов образуются и отрицательно заряженные и нейтральные центры  $V_{Zn}^-, V_{Zn}^{2-}, V_S^0, Zn_i^0, (V_{Zn}Al_S)^-$  и др. Перезарядка глубоких центров при фотовозбуждении существенно влияет на электрические свойства люминесцентных излучателей на основе ZnS:Mn [5].

Оценка концентрации свободных электронов и положения уровня Ферми  $\Delta F$  в исследованных диодных структурах дает следующие значения: в n<sup>+</sup>-области темновая концентрация  $n_T \sim 5 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>,  $\Delta F \approx 0,3$  эВ; в n-области  $n_T \sim 10^4$  см<sup>-3</sup>,  $\Delta F \approx 0,8–0,9$  эВ. Между n- и n<sup>+</sup>-областями образуется переход диффузионного профиля с высотой барьера 0,5–0,6 эВ.

Вид барьера в контакте Ni-n-ZnS зависит от соотношения работ выхода и влияния поверхностных состояний. Работа выхода никеля равна 4,84 эВ, электронное сродство для ZnS (энергия от дна зоны проводимости до уровня вакуума) составляет 3,8–3,9 эВ [1]. Кроме того, отрицательно заряженные поверхностные состояния с плотностью порядка  $10^9–10^{10}$  см<sup>-2</sup> приводят к изгибу зон вверх и образованию барьера вблизи поверхности порядка  $10^{-1}$  эВ [6]. Поверхностный заряд компенсируется положительным зарядом в области обеднения, прилегающей к Ni-контакту. Таким образом, контакт Ni-n-ZnS является запирающим для основных носителей с высотой барьера около 0,2 эВ.

Край собственного поглощения ZnS находится в ближней УФ-области спектра вблизи  $\lambda = 335$  мкм. Поглощение обусловлено прямыми переходами из валентной зоны в основную минимум зоны проводимости. Коэффициент поглощения  $\alpha$  в интервале  $\lambda = 335 \pm 9$  нм меняется от 10 до  $10^5$  см<sup>-1</sup>. Для УФ-света ( $\lambda = 365$  нм), используемого для освещения диодов при измерении ВАХ,  $\alpha \approx 3 \cdot 10^2$  см<sup>-1</sup>. Это означает, что интенсивность света уменьшается в  $e = 2,73$  раз на глубине примерно 30 мкм.

Высокую фоточувствительность диодов при прямом смещении можно объяснить следующим образом. Почти все напряжение, приложенное к диоду, приходится на высокоомный  $n$ -слой, сопротивление которого в темноте на несколько порядков больше, чем в  $n^+$ -области. Темновой ток обусловлен в основном инжекцией электронов из  $n^+$ -области и дрейфом в  $n$ -области. При толщине  $d = 10$  мкм, подвижности  $\mu_n = 140$  см<sup>2</sup>/В·с, времени жизни  $\tau_n \sim 10^{-6}$  с [1] и напряжении  $U = 10$  В время пролета электронов  $t \approx \frac{d^2}{\mu_n U} \approx 10^{-9}$  с.

При освещении проводимость  $n$ -слоя увеличивается в результате следующих процессов:

- фоторезистивный эффект;
- генерированные светом дырки захватываются глубокими центрами и нейтрализуют отрицательный объемный заряд, что приводит к снижению потенциального барьера и увеличению инжекции электронов. Нейтрализация заряда может происходить, например, по схеме  $V_S^0 + p \rightarrow V_S^+$ ,  $V_S^+ + p \rightarrow V_S^{2+}$  с участием вакансий серы;
- снижение сопротивления  $n$ -слоя приводит к перераспределению напряжения в диодной структуре. Напряжение на  $n^+$ - $n$ -переходе и инжекция электронов увеличиваются, что вызывает вновь перераспределение напряжения и т.д.;
- дырки, генерированные светом вблизи контакта Ni- $n$ -ZnS, нейтрализуют отрицательный заряд поверхностных состояний, что снижает барьер Шотки.

При обратном смещении диодных структур инжекция электронов из Ni-контакта затруднена, так как высота барьера на этом контакте составляет примерно 1 эВ. Напряжение, приложенное к диоду, перераспределяется между переходами и  $n$ -слоем. Генерированные светом дырки движутся к Ni-контакту и рекомбинируют, что приводит к значительно меньшим токам при обратном смещении.

### Литература

1. Физика соединений / Под ред. А.Н.Георгобиани, М.К.Шейнкмана. – М.: Наука, 1986. – 320 с.
2. Лосев В.В., Орлов Б.М., Стафеев В.И. Фотоэлектрические свойства диодов на основе высокоомного ZnS // ФТП. – 1975. – Т. 9, вып. 1. – С. 41–45.
3. Лосев В.В., Лубегин Г.В., Орлов Б.М. Селективные фотодиоды на основе монокристаллов A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup> для контроля процессов сухого размерного травления // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. – 1990. – Вып. 2(136). – С. 72–74.
4. Мамедов А.Л. Аппроксимации температурно-частотных характеристик контактов металл-полупроводник с барьером Шотки // Изв. вузов. Электроника. – 2007. – № 1. – С. 36–40.
5. Гурин Н.Т., Шляпин А.В., Сабитов О.Ю., Рябов Д.В. Влияние фотовозбуждения на электрические характеристики тонкопленочных электролюминесцентных структур на основе ZnS:Mn // ЖТФ. – 2003. – Т. 73, вып. 4. – С. 90–99.
6. Дэвисон С., Левин Дж. Поверхностные состояния. – М.: Мир, 1973. – 390 с.

Статья поступила  
8 февраля 2008 г.

**Лосев Виктор Васильевич** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики МИЭТ. Область научных интересов: физика полупроводников и диэлектриков, фотоэлектрические процессы в фотоприемных структурах, зондовая микроскопия.

# Особенности движения заряженных частиц в ВЧ-поле при амплитудной модуляции питающего напряжения квадрупольного фильтра масс

А.В.Мальцев

Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)

Рассмотрены особенности движения заряженных частиц в квадрупольном поле при амплитудной модуляции питающего напряжения, подаваемого на противоположные электроды фильтра масс. Исследовано влияние глубины амплитудной модуляции и величины модулирующей частоты на диаграмму стабильности движения ионов и разрешающей способности масс-анализатора.

В настоящее время квадрупольные масс-спектрометры широко применяются в медицине, химии, экологии при анализе молекулярных структур и состава вещества. Основными характеристиками масс-спектрометра являются чувствительность, разрешающая способность, диапазон спектра масс. Разрешающая способность и диапазон спектра масс определяются в основном параметрами и выбором режима работы генератора высокой частоты, обеспечивающего подачу сигнала возбуждения на квадрупольный фильтр масс. Актуальной является задача исследования движения ионов в фильтре масс при сложном гармоническом воздействии [1]. Решение этой задачи позволит улучшить характеристики приборов без существенного их изменения и расширить области применения масс-спектрометрии. Цель настоящей работы – исследование особенностей движения ионов в ВЧ-поле при модуляции питающего напряжения квадрупольного фильтра масс.

**Постановка задачи.** В основе работы масс-спектрометра лежит принцип разделения ионов по удельным зарядам при их движении в квадрупольных высокочастотных полях масс-анализатора. Для разделения частиц используется квадрупольное поле, создаваемое системой симметрично расположенных вдоль оси круглых электродов.

Большинство современных квадрупольных масс-спектрометров работают на фиксированной частоте и осуществляют сканирование по спектру масс путем изменения переменной и постоянной составляющих напряжения генератора высокой частоты при постоянном значении частоты электрического поля. На две пары противоположных электродов анализатора в этом случае подается напряжение вида

$$U = \pm(U_0 + U_m \sin(\omega t)),$$

где  $U_0$  и  $U_m$  – соответственно постоянная и переменная составляющие напряжения;  $\omega$  – круговая частота.

В рабочем объеме анализатора (в пространстве между стержнями) создается квадрупольное распределение потенциала. Движение заряженных частиц в таких полях описывается уравнением Хилла:

$$\frac{d^2 u}{dz^2} + J(z)u = 0,$$

где  $J(z)$  – четная функция от  $z$  с периодом  $\pi$ .



Для вещественного  $z$  функция  $J(z)$  имеет вид

$$J(z) = Q_0 + 2Q_1 \cos(2z) + 2Q_2 \cos(4z) + \dots,$$

где  $Q_n$  – заданные постоянные и ряд  $\sum_{n=0}^{\infty} Q_n$  абсолютно сходится;  $z$  – время в безразмерных единицах. Безразмерные параметры  $Q_n$  зависят от исследуемой координаты, параметров иона, питающего напряжения и геометрии фильтра масс:

$$Q_n = \frac{8eU_n}{M\Omega^2 r_0^2},$$

где  $U_n$  – амплитуда  $n$ -й гармоники питающего напряжения;  $M$  – массовое число;  $r_0$  – основной геометрический размер электродной системы;  $\Omega$  – угловая частота.

Положив  $Q_{-n} = Q_n$ , согласно [2] решение уравнения Хилла найдем в виде

$$u = e^{\mu z} \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n e^{2niz}.$$

Коэффициент  $\mu$  рассчитывается с помощью определителя Хилла и позволяет определить стабильность траектории движения при заданной амплитуде модулирующего напряжения и глубине модуляции питающего напряжения фильтра масс.

Целью настоящего исследования является изучение движения ионов в квадрупольном поле при модуляции напряжения питания фильтра масс и определение оптимальных параметров модуляции, обеспечивающих наилучшую разрешающую способность.

**Результаты и их обсуждение.** Рассчитаем с помощью уравнения Хилла характеристики движения заряженных частиц при амплитудной модуляции высокочастотной составляющей питающего напряжения.

Выходное напряжение генератора высокой частоты при амплитудной модуляции имеет вид

$$\begin{aligned} S(t) &= \pm(U - U_w \cos(wt))(1 + m \cos(w_0 t)) = \\ &= \pm\{U - U_w \cos(wt) - U_{w_0} \cos[(w + w_0)t] - U_{w_0} \cos[(w - w_0)t]\}, \end{aligned}$$

где  $mU_w/2 = U_{w_0}$ ;  $U$  – амплитуда постоянной составляющей напряжения;  $U_w$  – амплитуда ВЧ составляющей напряжения;  $m$  – коэффициент модуляции;  $w$  – центральная частота;  $w_0$  – модулирующая частота.

Проанализируем изменение диаграммы стабильности при амплитудной модуляции сигнала генератора. Согласно расчетам применение амплитудной модуляции высокочастотной составляющей питающего напряжения приводит к расщеплению диаграммы стабильности на острова стабильности (рис.1).

При этом увеличение амплитуды модулирующего напряжения приводит к уменьшению площади рабочего острова стабильности и его смещению в область больших значений масс (рис.2).

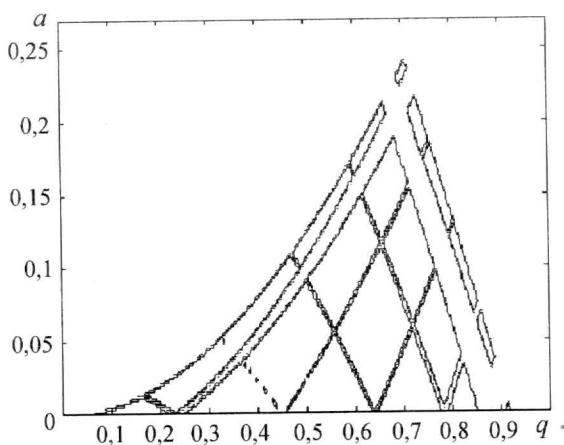


Рис.1. Диаграмма стабильности при  $w/w_0 = 1/6$  и  $U_w/U_{w_0} = 0,01$

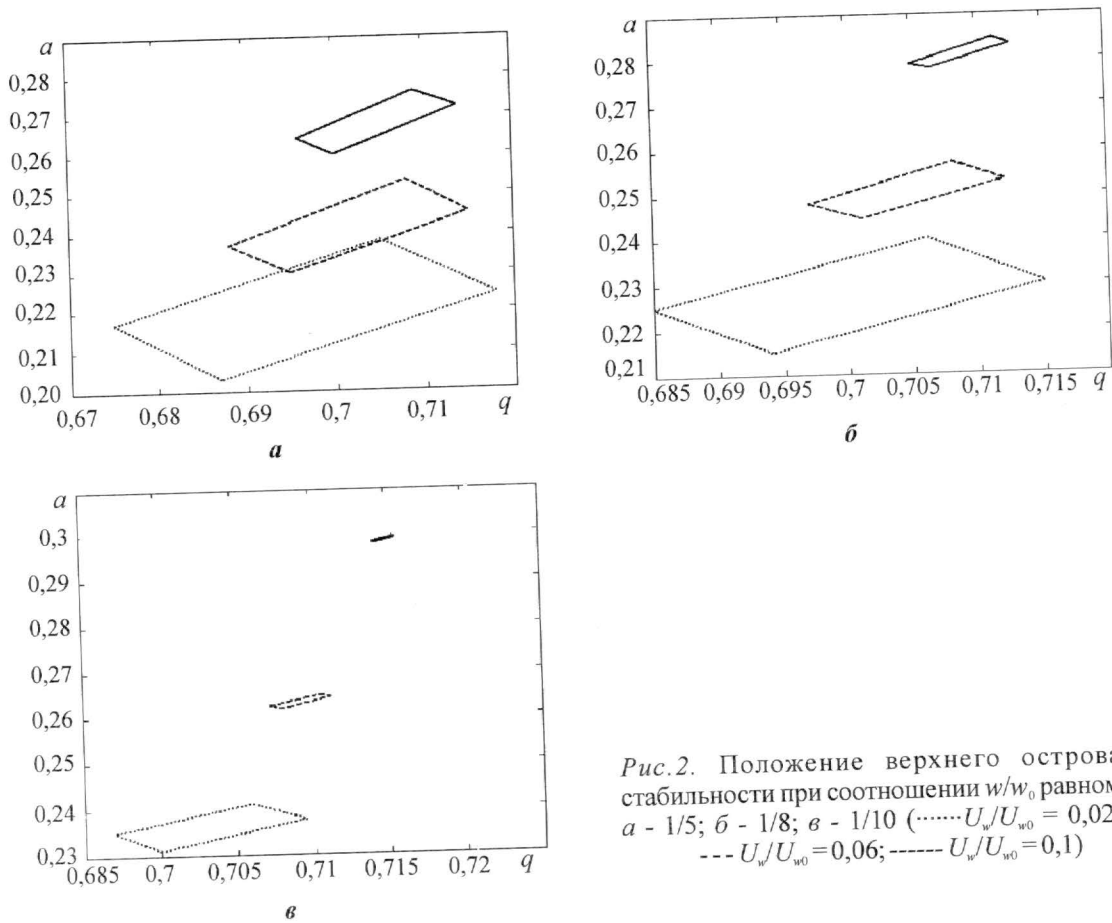


Рис.2. Положение верхнего острова стабильности при соотношении  $w/w_0$  равном а - 1/5; б - 1/8; в - 1/10 (.....  $U_w/U_{w0} = 0,02$ ; ---  $U_w/U_{w0} = 0,06$ ; - - -  $U_w/U_{w0} = 0,1$ )

Разрешающая способность согласно [3] определяется как

$$R = \frac{q_0}{a_0} (2\lambda - K_x)(2\lambda - K_y) \left[ (K_x - K_y) \left( 1 - \frac{\lambda}{\lambda_{\max}} \right) \right]^{-1},$$

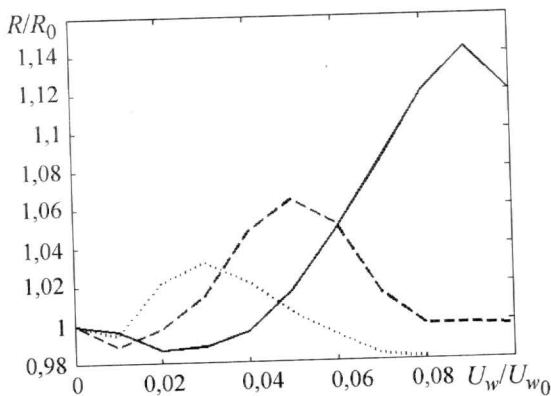


Рис.3. Зависимость относительной разрешающей способности от отношения амплитуды высокочастотной составляющей к амплитуде модулирующей: .....  $w/w_0 = 1/12$ ; ---  $w/w_0 = 1/9$ ; —  $w/w_0 = 1/5$

где  $a_0, q_0$  — координаты вершины диаграммы стабильности;  $\lambda_{\max} = a_0 / 2q_0$ ;  $K_x = \frac{a - a_0}{q - q_0}$

при  $a \rightarrow a_0 - \Delta$  и  $q \rightarrow q - \Delta$ ;  $K_y = \frac{a - a_0}{q - q_0}$  при  $a \rightarrow a_0 + \Delta$  и  $q \rightarrow q_0 + \Delta$  (при  $\Delta \rightarrow 0$ ).

Результаты расчетов при разном соотношении высокочастотной и модулирующей частоты приведены на рис.3 ( $R_0$  — разрешающая способность без модуляции питающего напряжения, подаваемого на электроды фильтра масс).

Следует отметить, что амплитудная модуляция питающего напряжения квадруполь-

ного фильтра масс приводит к изменению пропускающей способности и чувствительности.

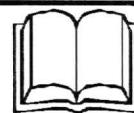
Таким образом, особенность применения амплитудной модуляции состоит в расщеплении диаграммы стабильности на острова стабильности. Увеличение амплитуды модулирующего напряжения приводит к уменьшению площади рабочего острова стабильности и его смещению в область больших значений масс. Разрешающая способность принимает максимальное значение при отношении  $w/w_0 = 1/12$  и отношении  $U_w/U_{w0} = 0,09$  и равна  $1,15 \cdot R_0$ . Увеличение отношения  $w/w_0$  приводит к уменьшению максимума разрешающей способности и достигается при меньшем соотношении  $U_w/U_{w0}$ .

### Литература

1. **Судаков М.Ю.** Диаграмма стабильности секулярного движения ионов, захваченных в радиочастотном квадрупольном поле, при наличии дополнительного гармонического квадрупольного воздействия // Письма в ЖТФ. – 2000. – Т.16, вып.19. – С. 37–43.
2. **Уиттекер Э.Т., Ватсон Дж. Н.** Курс современного анализа. – Изд. 3-е. М., 2002. – С. 269–273.
3. **Слободенюк Г.И.** Квадрупольные масс-спектрометры. – М.: Наука, 1973. – С. 260.

Статья поступила 11 декабря 2007 г.

**Мальцев Андрей Васильевич** – аспирант кафедры промышленной экологии МИЭТ. Область научных интересов: исследование характеристик квадрупольных масс-анализаторов, разработка генератора высокой частоты квадрупольного масс-анализатора.



### Книжные новинки

#### Нанотехнологии. Наноматериалы. Наносистемная техника

#### Мировые достижения – 2008 год

Сборник под редакцией д.т.н., профессора П.П.Мальцева

Москва: Техносфера, 2008.



Данная работа является продолжением серии книг издательства «Техносфера» по мировым достижениям в области нанотехнологий. Книга охватывает материалы, опубликованные в 2006–2008 гг. в журнале «Нано- и микросистемная техника» и сгруппированные по разделам, охватывающим наноматериалы, нанoeлектронику, нанодатчики и наноустройства, диагностику наноструктур и наноматериалов, нанобиотехнологию и применение нанотехнологий в медицине. В цветном издании представлены примеры реализации и применения в области технологии формирования наноструктур, методов исследования наноматериалов, метрологическое обеспечение и основы технологии наносистемной техники.

По просьбе читателей в книгу введен новый раздел – АНГЛО-РУССКИЙ ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ ПО МИКРО- И НАНОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКЕ.

Сборник представляет интерес для ученых, инженеров и преподавателей высшей школы, аспирантов и студентов, специализирующихся в области нанотехнологий, наноматериалов, нанoeлектроники, микро- и наносистемной техники.

# СХЕМОТЕХНИКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ

УДК 658.512.011.56

## Применение компиляционного подхода к моделированию аналоговых схем

Д.А.Булах

Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)

Предложен новый способ построения программ автоматизации схемотехнического проектирования, основанный на компиляционном подходе к моделированию схем. Проведено сравнение скорости расчета ряда схем во временной области с результатами программы, использующей традиционный подход.

В основу работы большинства программ автоматизации схемотехнического проектирования (АСХТП) положена следующая последовательность этапов:

- 1) считывание схемы из описания на одном из схемотехнических языков;
- 2) трансляция описания схемы во внутреннее представление программы;
- 3) формирование векторов и матриц, участвующих в расчете математической модели схемы, инициализация начальных значений вектора переменных;
- 4) решение сформированной математической модели схемы в зависимости от режима моделирования и применяемых методов.

При проведении моделирования последний этап является наиболее ресурсоемким с точки зрения затрат вычислительного времени. Алгоритм этого этапа представлен на рис.1. В качестве примера рассмотрен алгоритм расчета схемы методом узловых потенциалов во временной области, в котором методом интегрирования является неявный метод Эйлера с фиксированным шагом, а для решения системы нелинейных уравнений используются методы Ньютона и Гаусса.

На данном этапе основное вычислительное время занимают процедуры формирования вектора токов схемы, формирования матрицы проводимостей ветвей схемы и решение системы уравнений методом Гаусса [1].

В современных схемотехнических программах-симуляторах используются различные алгоритмы, ускоряющие процесс решения системы нелинейных уравнений. Однако практически не существует эффективных подходов к ускорению процесса формирования математических моделей, т.е. заполнения значениями вектора токов и матрицы проводимостей схемы. На сегодняшний день существуют два наиболее удачных подхода, но каждый из них имеет свои недостатки.

Первый из них заключается в том, что предлагается заполнять вектор и матрицу значениями до начала выполнения внешнего цикла. Затем внутри цикла на каждом шаге перезаписывать только те значения, которые соответствуют нелинейным элементам, поскольку только их значения будут меняться при изменении значений потенциалов.



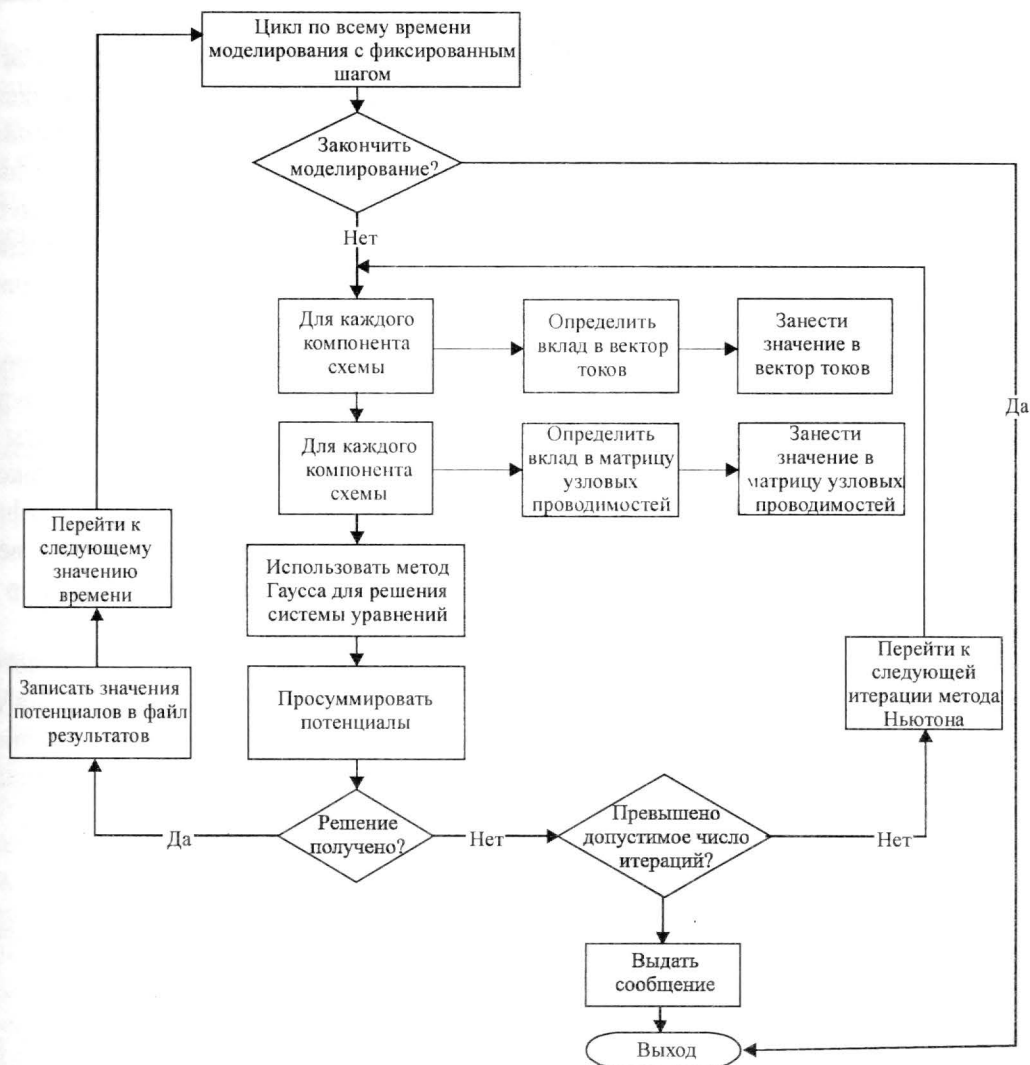


Рис. 1. Алгоритм расчета временных характеристик

Такой метод имеет следующие недостатки:

- требуется дополнительная оперативная память компьютера для сохранения номеров нелинейных элементов, которые необходимо перезаписывать;
- поскольку при решении системы уравнений методом Гаусса изменяются значения как элементов исходной матрицы, так и исходного вектора токов, необходимо затрачивать дополнительную оперативную память на хранение двух матриц проводимостей – оригинальную и используемую при решении методом Гаусса, а также на хранение двух векторов токов;
- использование такого метода актуально только для схем, содержащих в процентном соотношении малое число нелинейных элементов.

Второй метод заключается в том, что в программном коде в объекте, отвечающем за каждый узел схемы, сохраняется информация о том, какие элементы подключены к этому узлу, например, в виде указателей на объекты соответствующих элементов. Недостатки этого подхода следующие:

- требуется дополнительная оперативная память на сохранение нескольких указателей для каждого узла;
- указатели для одного и того же элемента, подсоединенного к разным узлам, дублируются.

Использование второго подхода требует меньше времени для моделирования схем, однако у описанных подходов наблюдается один общий недостаток – при определении вклада элемента «резистор» в матрицу проводимостей в программе для получения значения проводимости приходится обращаться к методу объекта, реализующего данный элемент. При моделировании схем больших размерностей, содержащих в процентном соотношении значительное число резистивных элементов, таких, как схемы после экстракции паразитных элементов из топологии, эта процедура может внести значительный вклад в общее время расчета схемы.

Максимально ускорить заполнение значений вектора токов и матрицы проводимостей можно лишь полностью избавившись в программе-симуляторе от процедуры перебора узлов схемы. Аналитически это действие очевидно: составление системы топологических уравнений для всех рассматриваемых узлов схемы [2]. Однако при составлении математической модели схемы программе АСхТП неизвестна конфигурация схемы, поэтому единственным способом заполнения значений матрицы и вектора является прямой перебор ветвей и определение вклада каждой из ветвей в вектор токов и матрицу проводимостей [3].

Более эффективным для скорости работы программы моделирования является решение, исключаящее (или сводящее к минимуму) затраты машинного времени на составление вектора токов и матрицы проводимостей. Предлагаемый подход компиляционного моделирования основан на реализации этого решения и предполагает выполнение следующих этапов:

- 1) считывание схемы из описания на одном из языков описания схем;
- 2) трансляция схемы во внутреннее представление программы;
- 3) анализ схемы, генерация программного кода, описывающего процесс моделирования данной схемы;
- 4) компиляция исходных кодов и запуск скомпилированной программы.

Отличие данного подхода заключается в том, что на этапе 3 выполняется анализ структуры схемы и генерируется исходный файл на языке программирования высокого уровня (например, C++), содержащий конструкции для моделирования требуемой схемы, причем для вектора токов и матрицы проводимостей записываются явные выражения.

Помимо программного кода, служащего для составления математической модели и ее решения, в генерируемую программу включается также код для вывода сохраняемой информации в требуемом формате для последующего отображения в графическом постпроцессоре. На этапе 4 программа-симулятор компилирует полученный исходный код и запускает программу на исполнение, ожидая ее завершения.

Работа описываемого подхода продемонстрирована на примере расчета тестовой схемы (рис.2). Схема содержит импульсный источник напряжения, к которому подсоединяется определенное число подсхем, каждая из которых содержит диод, два резистора и конденсатор. На рисунке изображена одна подсхема.

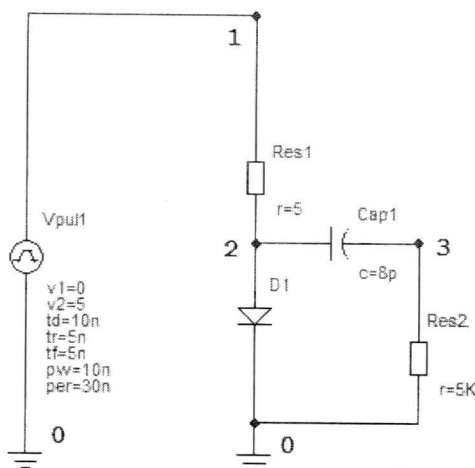


Рис.2. Анализируемая схема

При расчете данной схемы методом узловых потенциалов неизвестными являются потенциалы в узлах. Поскольку потенциалы в узлах «0» и «1» известны в любой момент времени, они в процессе моделирования не учитываются. Относительно оставшихся узлов (узлы «2» и «3») формируются математические модели.

Расчет во временной области методом узловых потенциалов сводится к решению на каждом шаге интегрирования системы нелинейных уравнений вида:

$$Ax = b,$$

где  $A$  – матрица узловых проводимостей;  $x$  – вектор неизвестных (вектор потенциалов);  $b$  – вектор токов.

Размерность вектора токов  $b$  равна числу неизвестных потенциалов в схеме, каждый элемент вектора токов формируется следующим образом:

$$b[i] = \sum_{j=1}^k I_j,$$

где  $k$  – число элементов, подсоединенных к  $i$ -му узлу;  $I_j$  – ток, протекающий через соответствующий элемент.

Для сравнения компиляционного и традиционного способов моделирования написаны две программы: первая программа представляет собой классический SPICE-подобный симулятор, вторая программа – реализацию описываемого подхода. Разработанные программы абсолютно идентичны с точки зрения используемых математических методов (обе программы используют неявный метод Эйлера с фиксированным шагом, метод Ньютона и метод Гаусса) и различаются лишь способами формирования вектора токов и матрицы проводимостей. В качестве сравниваемого симулятора не был взят ни один из уже существующих по причине того, что в существующих симуляторах, например AVOSPICE, HSPICE и SPECTRE, заложены специальные алгоритмы, увеличивающие вычислительную производительность при решении математических моделей.

В общем виде процесс формирования вектора  $b$  можно выразить следующим участком псевдокода:

```
for(i = 0; i < netlist.nodes_count; i = i + 1) {
    for(j = 0; j < netlist.elements_count; j = j + 1) {
        if(netlist.elements[j].connected_with(netlist.nodes[i]))
            b[j] = b[j] + netlist.elements[j].get_current_trough();
    }
}
```

Матрица  $A$  представляет собой матрицу узловых проводимостей схемы. Процесс формирования ее элементов представляется в псевдокоде следующим образом (рассмотрен процесс формирования матрицы для двухполюсных элементов):

```
for(i = 0; i < netlist.nodes_count; i = i + 1) {
    for(j = 0; j < netlist.nodes_count; j = j + 1) {
        for(k = 0; k < netlist.elements_count; k = k + 1)
            if(netlist.elements[k].connected_with(netlist.nodes[i]) &&
                netlist.elements[k].connected_with(netlist.nodes[j]))
                A[i][j] = A[i][j] + netlist.elements[k].get_conductance();
    }
}
```

Из приведенных листингов псевдокода видно, что процесс составления вектора токов и матрицы проводимостей требует многократного перебора всех элементов схемы, что при большой размерности схемы приводит к значительным затратам времени.

В результате работы программы, реализующий компиляционный подход, формируется код, описывающий явные выражения для всех элементов вектора **b** и матрицы **A**.

Ниже приведен участок кода на языке С++, демонстрирующий процесс формирования математической модели для схемы на рис.2.

```
I[0] = -/*r01*/((v1.v_at(time) - fi_n[0])/5.)
      +/*d01*/(1.2e-10)*(exp((fi_n[0])/0.025) - 1.)
      +/*c01*/((8.e-12)/euler_step)*((fi_n[0]-fi_n[1])-(fi_n_1[0]-
-fi_n_1[1]));
```

```
I[1] = +/*r02*/((fi_n[1])/(5.e+3))
      -/*c01*/((8e-12)/euler_step)*((fi_n[0]-fi_n[1])-(fi_n_1[0]-
-fi_n_1[1]));
```

```
J[0][0] = -/*r01*/(1./5.)
          -/*d01*/(1.2e-10)*(1./0.025)*exp((fi_n[0])/0.025)
          -/*c01*/((8.e-12)/euler_step);
```

```
J[0][1] = +/*c01*/((8.000000e-
012)/euler_step);
```

```
J[1][0] = -/*c01*/(-(8.000000e-
012)/euler_step);
```

```
J[1][1] = -/*r02*/(1./5.e+3)
          -/*c01*/(8.000000e-
012)/time_step);
```

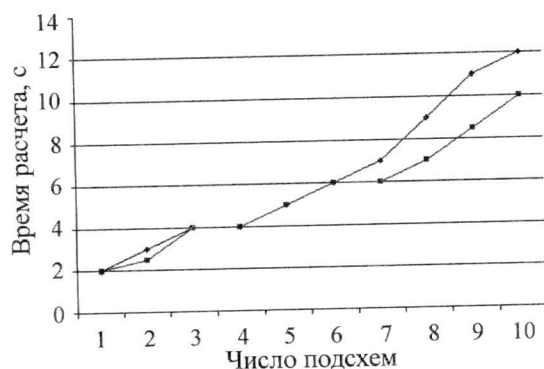


Рис. 3. Результаты сравнения симуляторов:

- ♦— SPICE-подобный симулятор;
- компилирующий симулятор

Результаты сравнения двух программ представлены на рис.3.

Видно, что при использовании одинаковых методов, заложенных в основу вычислений, компиляционный подход к формированию математических моделей сокращает общее время расчета схем.

### Литература

1. *Albert Tatum Davis*. Implicit Mixed-Mode Simulation of VLSI circuits: PhD dissertation. 1991.
2. *Казённых Г.Г.* Основы проектирования интегральных схем и систем. - М.: «БИНОМ. Лаборатория знаний». - 2005.
3. *Ильин В.Н., Коган В.Л.* Разработка и применение программ автоматизации схемотехнического проектирования. - М.: Радио и связь. - 1984. - 368 с.

Статья поступила  
12 февраля 2008 г.

**Булах Дмитрий Александрович** – старший преподаватель кафедры проектирования и конструирования интегральных микросхем МИЭТ. Область научных интересов: автоматизация проектирования, программирование алгоритмов САПР.



## **Автоматизация проектирования библиотек стандартных элементов на основе параметризованных ячеек в САПР Cadence**

*Т.Ю.Крупкина, В.В.Лосев, Н.Н.Муханюк, М.Г.Путря*

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

Рассмотрены направления развития научно-образовательных программ в области проектирования микроэлектронных устройств, подчеркнута значимость вовлечения студентов и аспирантов в научную работу в области проектирования. Исследованы проблемы проектирования библиотек стандартных элементов, предложены пути автоматизации на основе параметрических ячеек и применения методов оптимизации. Представлен прототип параметрической ячейки инвертора, выполненный в соответствии с предлагаемой теоретической базой.

Развитие научно-образовательной программы Российско-американского Института проектирования приборов и систем Cadence, осуществляемой в МИЭТ, направлено на создание эффективной системы подготовки научных кадров на основе новейших инструментов автоматизированного проектирования ИС с целью обеспечения ускоренного развития российской электроники по важнейшим приоритетным направлениям, в том числе в области разработки новейшей элементной базы микроэлектроники и микросистемной техники. Для решения этой задачи необходимо на основе кооперации с ведущими мировыми компаниями сформировать научно-исследовательскую обучающую платформу для подготовки научных кадров, обеспечивающую активное вовлечение студентов и аспирантов в процесс актуальных и практически значимых научных исследований [1].

Развитие научно-методической базы по подготовке аспирантов и студентов в области микроэлектроники и микросистемной техники основывается на результатах научно-исследовательских работ, проводимых по перспективным направлениям исследований с использованием новейших программных и аппаратных средств.

Одним из приоритетных научных направлений как у нас в стране, так и за рубежом является развитие методов проектирования и моделирования элементной базы микроэлектроники. Анализ современных СБИС и систем на кристалле содержит значительное число вычислительных этапов (итераций). При этом используются средства и методы, позволяющие выбирать альтернативные проектные решения и оптимизации проекта. Все более важной становится задача поддержки функции анализа на высоком уровне. Для реализации таких подходов прежде всего необходимы организация интерфейса между вычислительными пакетами, интеграция программных средств, создание вычислительных оболочек, обеспечивающих процесс интеграции. Функции таких интегрирующих оболочек должны охватывать автоматическую интеграцию программ в рамках моделируемых проектов; организацию пользовательского интерфейса к прикладным программам, оптимизацию.

В настоящее время наиболее широкое распространение получили дизайн-центры – организации, разрабатывающие различного рода интегральные схемы, но при этом не имеющие своих производственных мощностей (fabless). Их существование и успешное развитие стало возможно только благодаря тому, что фабрики, обладающие перспективными технологиями изготовления ИС, пытаются увеличить свой доход и окупить затраты на разработку технологии, стали изготавливать сторонние заказы. При этом фабрика предоставляет дизайн-центру библиотеку аналоговых примитивов, правила проектирования (Process Design Kit) и библиотеку цифровых примитивов (Digital Design Kit). Данный путь позволяет в полной мере реализовать замыслы разработчиков, особенно при использовании БиКМОП-технологии, позволяющей формировать на одном кристалле ИС с функциональными свойствами нескольких микросхем, изготовленных по разным технологиям. Предоставление фирмой библиотеки проектирования означает, что фирма имеет мощную производственную базу и готова изготовить по фабундрии-заказу пластины с проектом, разработанным покупателем данной библиотеки. В настоящее время многие зарубежные фирмы заявляют о своей готовности предоставить библиотеки проектирования. Однако разработка такой библиотеки является трудоемким процессом, базирующимся в основном на технологической библиотеке (Process Design Kit), в которой содержатся модельные файлы и различные файлы ограничений данного процесса. Полный маршрут проектирования цифровой библиотеки с использованием САПР Cadence [2] включает непосредственно разработку компонентов библиотеки, синтез дополнительных представлений и верификацию.

Автоматизация как процесса верификации, так и разработки в целом позволила бы экономить значительную часть времени. Сходство маршрута разработки цифровых библиотек и аналоговых заказных ИС позволяет задуматься о возможности применения методов автоматизации проектирования на основе параметризованных ячеек [3]. Отметим, что цифровые библиотеки более ориентированы на использование данного метода, так как схемотехника их компонентов проста и легко формализуема. Поэтому большинство характеристик элементов библиотеки определяются топологическим представлением или параметризованной ячейкой. Но параметрические ячейки изначально задумывались как средство автоматизации именно топологического проектирования и поэтому обладают значительным потенциалом использования на физико-топологическом этапе проектирования. Существует ряд команд, позволяющих получить численное значение того или иного физико-топологического ограничения и проинтегрировать масштабирование ячейки с его учетом. В настоящей работе показана возможность использования параметризованных ячеек при разработке цифровых библиотечных элементов.

Параметризованная ячейка является технологически независимой заготовкой будущего библиотечного элемента, поэтому не может содержать в себе никаких жестко заданных параметров. Все необходимые значения либо определяются пользователем, либо запрашиваются из технологического файла. В качестве примера создана параметризованная ячейка КМОП-инвертора, позволяющая синтезировать его символьное, схемотехническое и топологическое представления. Автоматизация синтеза других представлений, присутствующих в библиотеке, не является сложной.

Символьное представление наиболее простое, так как не предполагает каких-либо вариаций в зависимости от выбранной технологии. В рассматриваемом примере символьное представление содержит, помимо сигнальных портов, порты шин земли и питания.

Схемотехническая параметризованная ячейка, помимо своей основной задачи, а именно создания схемного представления, часто используется для первоначальной оптимизации электрофизических параметров будущего топологического представления. Известно, что существует зависимость занимаемой площади, быстродействия и потребляемой мощности. Библиотечные элементы будут использоваться в составе СБИС, где основной причиной задержек постепенно становятся задержки межсоединений. При проектировании библиотек стараются добиться примерно одинаковых значений задержек на всех логических вентилях, чтобы предотвратить гонки сигналов в асинхронных схемах. Увеличение площади и быстродействия инвертора повлечет необходимость увеличить быстродействие и других библиотечных элементов, что потребует гораздо большего, чем в случае инвертора, увеличения размера.

Специфика использования цифровых библиотек, а именно дальнейшая компиляция в составе СБИС налагает самое значимое ограничение на площадь. Компиляторы устроены таким образом, что размещают устройства в линейки одинаковой высоты, по границам которых проходят шины земли и питания. Линейки располагаются горизонтально симметрично относительно цепей питания для того, чтобы одна цепь питала сразу две строки. Поэтому высота ячейки фиксирована для всех цифровых элементов. Любое увеличение площади транзистора в горизонтальном направлении ведется путем разбиения его на «пальцы». Будем считать высоту ячейки основным ограничением при проектировании инвертора. Быстродействие элемента будет определяться задержками переключения из «нуля» в «единицу» и обратно. В идеальном случае они должны быть минимальны и попарно равны. Однако на практике добиться этого крайне сложно, так как существует разброс технологического процесса, присутствуют температурный дрейф, дрейф напряжения питания, возможна работа схемы на различную нагрузку. Учитывая указанные ограничения, сформулируем простейшую целевую функцию и функцию ограничения оптимизации инвертора:

$$F = F_1 \frac{|Td_{01} - Td_{10}|}{Td_{01} + Td_{10}} + F_2 \frac{|Tf_{01} - Tf_{10}|}{Tf_{01} + Tf_{10}} + F_3(Td_{01} + Td_{10}) + F_4(Tf_{01} + Tf_{10})$$

(где  $Td_{01}, Td_{10}, Tf_{01}, Tf_{10}$  – задержки и фронты;  $F_1, F_2, F_3, F_4$  – весовые коэффициенты, определяющие вклад каждого слагаемого);

$$CellWidth < W_n + W_p + W_{cont} + 4L_{metal}$$

( $CellWidth$  – высота ячейки;  $W_n, W_p$  – ширины  $n$ - и  $p$ -канальных транзисторов;  $W_{cont}$  – минимальный размер контакта;  $L_{metal}$  – расстояние между металлизациями).

Определив основные параметры, которые будут рассматриваться в процессе оптимизации, можно описать спецификацию параметрической ячейки рис.1,а. Как видно, в состав спецификации входят параметры, необходимые для создания тестовой схемы: напряжение питания и земли, а также коэффициент разветвленности по выходу. Для проведения оптимизации применялась схема кольцевого генератора прежде всего потому, что она позволяет сама генерировать входное воздействие, что является несомненным преимуществом, так как можно моделировать схему в условиях, приближенных к реальным режимам использования схемы рис.1,б. Результатами работы такой параметризованной ячейки являются значения ширины транзисторов, при которых ячейка максимально удовлетворяет требованиям спецификации:  $W_p = 4\mu$ ,  $W_n = 1,76\mu$  при этом  $Td_{01} = 33,01p$ ,  $Td_{10} = 33,14p$ ,  $Tf_{01} = 66,01p$ ,  $Tf_{10} = 67,71p$ . Полученные значения ширины  $n$ - и  $p$ -канальных транзисторов затем передаются в топологическую параметризованную ячейку. В данном примере транзисторы тоже выполнены на основе параметризованных ячеек,

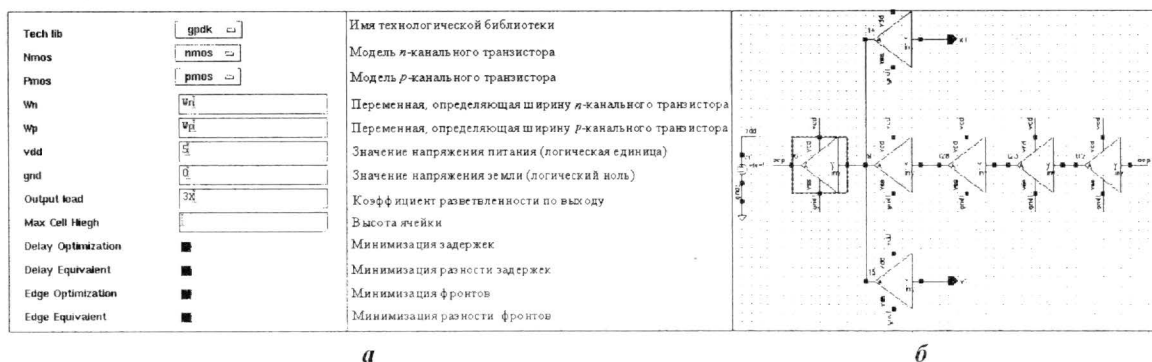


Рис. 1. Спецификация параметрической ячейки инвертора (а) и тестовая схема (б)

т.е. для синтеза их топологии достаточно указать лишь тип, длину, которая принимается минимальной, и ширину. Это позволяет разделить описание сходных объектов на своего рода классы. На начальном этапе необходимо разместить *nmos* и *pmos* устройства: *nmos* – размещается в точку (0, 0), *pmos* в (0, Max Cell Height). При этом транзистор должен быть симметрично отражен относительно горизонтальной оси (ось вертикальной симметрии) так, чтобы в указанной точке оказался левый верхний угол. Действия осуществляются при помощи следующих команд:

```
dbOpenCellViewByType(...)
dbCreateParamInst(...)
```

Для изоляции *p*-канальной структуры ее необходимо формировать в *n*-кармане. Если условие непрерывности кармана сопровождается правилом проверки, то значение высоты кармана можно получить, воспользовавшись функцией:

```
techGetSpacingRule(Id "minWidth" "Nwell").
```

Если такое правило не предусмотрено в технологическом файле, ширину кармана можно определить как сумму ширины *pmos* плюс удвоенное расстояние зазора кармана и диффузии. Длина кармана должна быть равна длине всей ячейки. Карман совмещается своим центром с центром *p*-канального транзистора.

Затем, чтобы сформировать выходную цепь инвертора, создается ROD-объект в слое металлизации «metal1». Ширина полагается минимально возможной, чтобы минимизировать выходную емкость. Точками привязки служат координаты верхнего правого края *pmos* и нижнего правого *pmos* за вычетом половины ширины металлизации. Функция, используемая при данном размещении, следующая:

```
rodCreateRect(...).
```

Затем создается квадратная область выходного контакта. Она определяется из суммы минимальной ширины контакта плюс удвоенная минимальная величина перекрытия контакта металлом. Затем совмещаются привязки сформированного ранее соединения с центром заготовки для контакта. Цепь маркируется лейблом выходного порта. С целью обеспечения возможности выбора слоя для будущей разводки создается только заготовка под контакт, но не сам контакт.

Формирование входной цепи начинается с полоски поликремния. Ширина полоски определяется как минимальная среди длин затворов *nmos* и *pmos*. Минимальная длина поликремниевого затвора определяется на этапе создания параметризованной ячейки транзистора. Размещение проводится по центру затворов, затем формируются три вложенные друг в друга области контакта. Все они выровнены по центру и расположены посередине созданной области поликремния.



Наиболее простой способ создания шин земли и питания – это запросить координаты границ металлизации в параметризованных ячейках транзисторов, прибавить минимальное расстояние между металлизацией, создать прямоугольную область металла в полученных точках и соединить их со стоковыми областями транзисторов еще одним объектом металлизации. В итоге будет получена топология инвертора, показанная на рис.2.

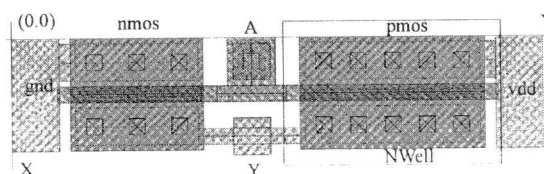


Рис.2. Полученная топология инвертора (поворот 90°)

Таким образом, разработан метод автоматизации процесса проектирования библиотек стандартных элементов, показано практическое применение метода на примере САПР Cadence. Отличительной особенностью предложенного метода является совмещение принципов оптимизации для поиска физических параметров структуры и применение параметризованной ячейки для синтеза топологии, что позволило организовать комплексный технологически независимый метод решения задачи проектирования. Основное преимущество данного метода – сокращение общего времени проектирования, что имеет явное коммерческое преимущество.

Развитие научно-методической базы научно-образовательного проекта Российско-американского Института Cadence направлено на совершенствование системы подготовки и выпуска специалистов в области проектирования полупроводниковых интегральных микросхем и микросистем, т.е. в областях, наиболее востребованных электронной промышленностью во всем мире. Представленные результаты характеризуют процесс привлечения студентов, аспирантов и молодых специалистов к научной работе в области проектирования микроэлектронных устройств, служат основой для расширения возможностей программного пакета Cadence не только в проектировании, но и применительно к обеспечению учебного процесса подготовки и переподготовки кадров.

### Литература

1. Путья М.Г. Российско-американский Институт проектирования приборов и систем // Изв. вузов. Электроника. – 2004. – № 3. – С. 26, 27.
2. Gilles Lamant, Brian Campbell, David Neiman, Jessica Felipe «Generic Standard Cell Library Revision 1.0».
3. Муханюк Н.Н. Разработка программного обеспечения автоматизации схемотехнического проектирования аналоговых ИС // Тез. докл. 13-й Всероссийской межвузовской науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2006». – М.: МИЭТ, 2006. – С. 85.

Статья поступила  
5 марта 2008 г.

**Крупкина Татьяна Юрьевна** – доктор технических наук, профессор кафедры интегральной электроники и микросистем (ИЭМС) МИЭТ. Область научных интересов: моделирование технологических процессов и интегральных приборов, методы проектирования интегральной элементной базы и микросистем.

**Лосев Владимир Вячеславович** – кандидат технических наук, доцент кафедры ИЭМС МИЭТ. Область научных интересов: схемотехника устройств с малой потребляемой мощностью.

**Муханюк Николай Николаевич** – аспирант кафедры ИЭМС МИЭТ. Область научных интересов: автоматизация процесса проектирования интегральных схем на основе САПР Cadence.

**Путья Михаил Георгиевич** – доктор технических наук, профессор кафедры ИЭМС, декан факультета электроники и компьютерных технологий МИЭТ. Область научных интересов: перспективные технологии создания СБИС, развитие международных образовательных программ в области проектирования СБИС.

# ИНТЕГРАЛЬНЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.396.67

## Особенности проектирования цифровых антенных решеток

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

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

Рассмотрены задачи, возникающие при проектировании цифровой антенной решетки. Представлены результаты исследования влияния параметров АЦП на характеристики системы, проведено моделирование с целью исследования влияния амплитудно-фазового разброса на выстраиваемую диаграмму направленности.

В настоящее время быстрыми темпами развиваются беспроводные системы связи и беспроводные сети передачи данных. Основными проблемами являются ограниченное использование частотных ресурсов и помехозащищенность радиоканалов. Проблемы такого рода можно решать использованием технологий пространственного разделения каналов на базе цифровых антенных решеток (ЦАР) с возможностью цифрового диаграммообразования (ЦДО) [1–3].

Цель работы – исследование особенностей проектирования и моделирования цифровых и аналоговых блоков ЦАР.

ЦАР представляет собой антенную решетку с интегрированными цифро-аналоговыми и аналого-цифровыми преобразователями, а также процессором, который решает задачу анализа и обработки сигнала и радиообстановки в целом с последующим построением необходимой диаграммы направленности (ДН) для адаптивного подавления помех. Посредством цифровой обработки сигналов ЦАР позволяет улучшить характеристики покрытия и увеличить емкость сетей передачи данных [1].

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

Такая задача может быть решена с использованием аналоговой адаптивной антенной решетки, однако даже система, работающая с аналоговым сигналом, должна иметь в своем составе устройство, вырабатывающее сигналы управления весовыми коэффициентами, т.е. какой-либо микропроцессор. При этом для создания амплитудно-фазового распределения придется использовать аттенюаторы, что неизбежно ведет к потере энергии полезного сигнала, который в дальнейшем подвергается обработке.

В ЦАР такой проблемы нет, поскольку работа ведется с набором данных и можно учесть неизбежные потери в уровне сигнала за счет амплитудного распределения путем подбора соответствующих множителей. Таким образом, ЦАР обеспечивает дополнительную степень свободы при разделении сигналов от различных пользователей, добавляя к уже широко применяемым частотному, временному и кодовому пространственное разделение сигналов [1, 3].

При разработке подобной системы необходимо определиться с частотой дискретизации сигнала и схемой канала ЦАР, поскольку от них напрямую зависит выбор элементной базы системы. Например, для схемы, в которой сигнал дискретизируется на промежуточной частоте, требуется более быстрый АЦП, а схема с дискретизацией на низкой частоте не так требовательна к АЦП, но необходима максимальная идентичность каналов, что при использовании аналоговых устройств в канале не легко достигается. Кроме выбора частоты, также следует определить, где будет происходить выделение квадратурных составляющих, до или после оцифровки сигнала. В идеале оцифровка сигнала могла бы проводиться на высокой изначальной частоте сигнала, с последующей обработкой, но в настоящее время такая схема недоступна из-за отсутствия необходимых для этого супербыстродействующих АЦП. Например, для оцифровки сигнала ЦАР 2,4 ГГц, потребуется частота дискретизации 4,8 ГГц. Применение подобных АЦП не оправдает себя вследствие большой дороговизны таких устройств (частота дискретизации доступных промышленных АЦП менее 400 МГц). Кроме того, учитывая определенное число бит на выборку для обеспечения необходимого количества уровней квантования, цифровым вычислителям придется справляться с огромным потоком данных.

Рассмотрим два наиболее общих способа получения квадратурных составляющих:

- получение квадратур аналоговыми средствами и дальнейшее преобразование каждой из квадратур в цифровой вид с помощью аналого-цифрового преобразования;
- выполнение аналого-цифрового преобразования и разделение на квадратуры в цифровом виде.

На рис.1 приведен вариант построения цифрового приемника с разделением квадратур аналоговыми средствами. Сигнал с антенны через усилитель подается на первый смеситель и далее через полосовой фильтр поступает на второй смеситель, с выхода которого получаем две квадратурные составляющие, каждая из которых проходит через НЧ-фильтр и преобразуется в цифровую форму для дальнейшей обработки.

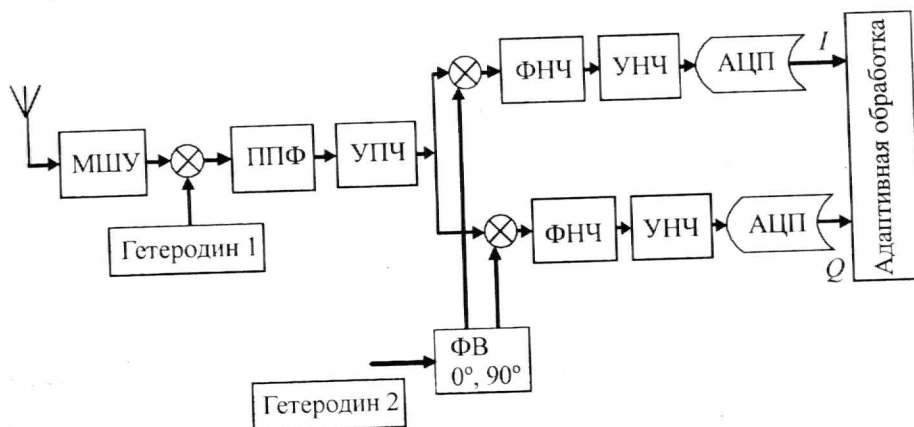


Рис. 1. Цифровой приемник с разделением квадратур аналоговыми средствами

Данное преобразование имеет свои недостатки:

- из-за применения аналоговых устройств трудно получить одинаковые характеристики для двух квадратур;
- вследствие возможной нестабильности синтезаторов нарушается ортогональность преобразования;
- фазовая характеристика из-за наличия нелинейных элементов неравномерна.

В данном случае требования к скорости преобразования АЦП невысокие и в основном определяются шириной информационного спектра.

На рис.2 показан вариант построения цифрового приемника с разделением квадратур цифровыми средствами. Приведенный способ осуществляет преобразование промежуточной частоты (ПЧ) в цифровую форму на более высокой частоте, а разделение квадратур происходит цифровым способом. Данный способ преобразования лишен недостатков предыдущей схемы и предоставляет широкий спектр возможностей по цифровой обработке сигнала. Вследствие того, что цифровой фильтр обладает значительно большей по сравнению с аналоговым фильтром крутизной, это позволяет с большей точностью выделять сигнал цифровыми методами. Но такая схема требует применения широкополосного быстродействующего АЦП и быстродействующих схем цифровой обработки [4].

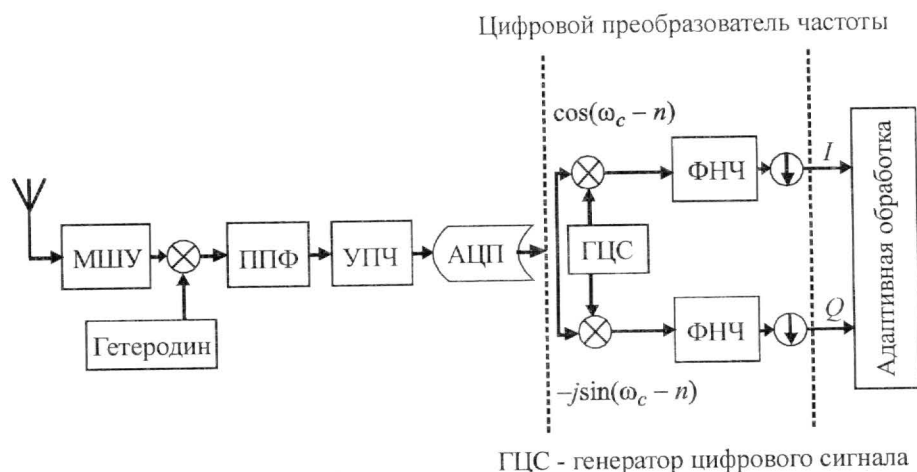


Рис.2. Цифровой приемник с разделением квадратур цифровыми средствами

Как видно из рис.1 и 2, оцифровку сигнала можно проводить, как на видеочастоте, так и на промежуточной частоте. Выбор схемы канала напрямую зависит от скорости и производительности АЦП, и наоборот, необходимые характеристики АЦП определяются выбором схемы канала.

Таким образом, важной задачей является выбор АЦП, использующихся в системе. Искажение сигнала при оцифровывании напрямую зависит от параметров АЦП. С целью получения минимального искажения сигнала при дискретизации необходимо определить минимальное количество уровней квантования, необходимое для удовлетворения заданному уровню искажений. Кроме того, на требуемое количество уровней квантования влияет количество элементов решетки, поэтому при проектировании антенны следует помнить, что для достижения заданного динамического диапазона необходимо увеличение количества уровней квантования при уменьшении количества элементов решетки. Таким образом, задача определения количества бит квантования приводит к необходимости моделирования поведения системы при выборе определенных характеристик АЦП.



В 2003–2006 гг. на кафедре микроэлектронных радиотехнических устройств и систем (МРТУС) МИЭТ были проведены исследования по созданию действующего макета системы пространственного подавления помех на базе 4-элементной ЦАР. Данный макет позволяет осуществить подавление двух сигналов помехи (количество подавляемых помех определяется ограничениями метода вычисления весовых коэффициентов), приходящих с известных направлений, формируя нули диаграммы направленности в этих направлениях и сохраняя положение основного лепестка неизменным. Для созданного прототипа была выбрана схема разделения квадратурных сигналов аналоговыми средствами на видеочастоте. Такой подход позволяет снизить требования к производительности АЦП и других цифровых блоков. Посредством разложения входного сигнала на две квадратурные  $I$ - и  $Q$ -составляющие решается задача представления входных сигналов в виде комплексных величин в цифровой диаграммообразующей схеме, которые именно в таком виде проходят дальнейшую обработку и умножаются на весовые коэффициенты. Задача получения квадратурных составляющих была эффективно решена использованием квадратурных демодуляторов, позволяющих получать низкочастотные квадратурные составляющие непосредственно из входного высокочастотного сигнала.

После того как получены низкочастотные аналоговые квадратурные составляющие, их необходимо перевести в цифровой код для дальнейшей обработки в диаграммообразующей схеме с наименьшими искажениями. Как уже упоминалось, величина искажений низкочастотного сигнала при его аналого-цифровом преобразовании определяется количеством уровней квантования, т.е. разрядностью АЦП. Для определения вносимых АЦП искажений было проведено математическое моделирование формирования результирующей ДН при использовании АЦП с различной разрядностью.

На рис.3 представлены результаты расчета ДН 4-элементной решетки с межэлементным расстоянием, соответствующим реальному макету, для непрерывного сигнала (сплошная линия), при наличии 2-разрядного АЦП в канале (штриховая линия) и при наличии 5-разрядного АЦП (штрихпунктирная). Из рисунка видно, что для формирования луча ДН на выходе сумматора достаточно оцифровывать входной сигнал с точностью до 5 бит квантования, поскольку кривая, соответствующая 5 битам квантования практически не отличается от кривой для непрерывного сигнала в канале. Однако 5 бит квантования достаточно только в случае наличия единственного сигнала на входе каждого канала, в противном случае, для того, чтобы правильно оцифровывать сигналы, отличающиеся по уровню, например на 20 дБ, необходимо добавить еще 4 бита. В результате требуется наличие девяти разрядов у АЦП. С этой точки зрения для создания действующего макета ЦАР был выбран АЦП, предназначенный для оцифровки квадратурных составляющих сигналов с точностью 10 бит и скоростью 20MSPS.

Далее оцифрованный сигнал поступает на вычислительный блок. В разработанном макете вычислительный блок реализован на базе программируемой логической инте-

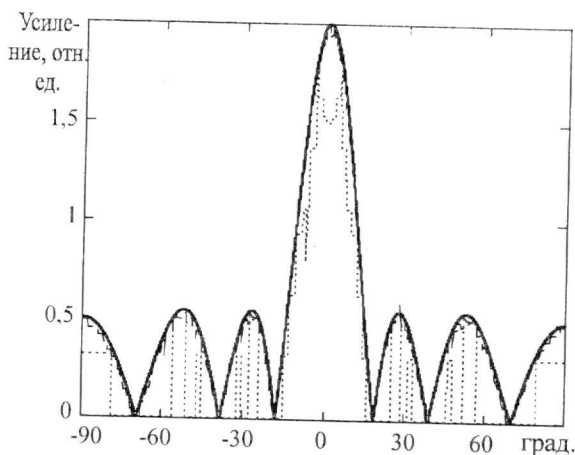


Рис.3. Оцифрованные и непрерывная ДН 4-элементной решетки

гальной схемы (ПЛИС) и цифрового сигнального процессора (ЦСП). В ПЛИС происходит умножение принимаемого сигнала на весовые коэффициенты, которые вычисляются непосредственно, исходя из направления на сигнал и помеху. ЦСП осуществляет управление решеткой.

При создании макета направление на сигнал и помеху считалось априори известным, однако при создании реальных систем связи следует учитывать, что столь подробная информация отсутствует, а следовательно, придется использовать более сложные алгоритмы определения направления прихода сигнала и адаптации, например MUSIC-алгоритм.

Кроме того, следует отметить, что реализованный в макете метод формирования заданной диаграммы направленности работает в предположении об идеальной идентичности каналов решетки, но в любой реальной системе существует разброс между каналами из-за неполной идентичности усилителей, схем преобразования частоты и т.д. Это приводит к неточностям в процессе выставления положения главного максимума и минимумов («нулей») ДН, а также к изменению их уровней.

На рис.4 показаны результаты моделирования по формированию ДН макета ЦАР. Как видно из рисунка, для достижения необходимой глубины подавления необходимо обеспечить ограничение амплитудно-фазового разброса в пределах 0,7 дБ и 6,5°.

На рис.5 представлены результаты моделирования влияния амплитудно-фазового разброса на ДН многолучевой ЦАР, разрабатываемой в настоящее время на кафедре. Из рисунка явно видно, что разброс влияет как на уровень перекрытия лучей, так и на уровень боковых лепестков.

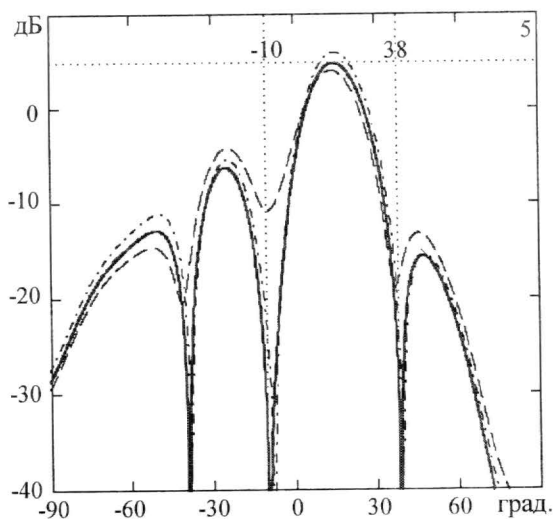


Рис. 4. Влияние амплитудно-фазового разброса на диаграмму направленности макета ЦАР (— без разброса; ---- 1 дБ, 13°; - - - - 0,7 дБ, 6,5°)

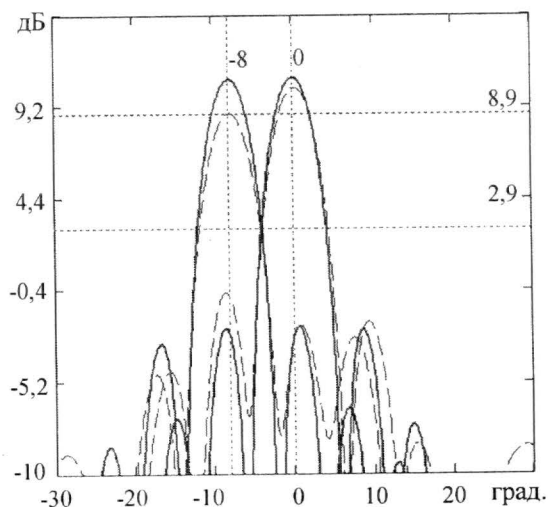


Рис. 5. Искажение ДН многолучевой ЦАР вследствие амплитудно-фазового разброса (— без разброса; ---- с учетом разброса)

Следовательно, при создании ЦАР необходимо либо добиваться максимальной идентичности каналов, либо отслеживать амплитудно-фазовый разброс с последующей компенсацией искажений при помощи внесения в цифровые данные дополнительных коэффициентов.

На сегодняшний день исследования построения ЦАР продолжают с целью усовершенствования подобных разработок. Быстрое развитие вычислительной техники делает возможным переход антенной техники и радиотехники в целом на новый качественный уровень. Кроме того, развитие и удешевление элементной базы может значительно снизить стоимость подобных антенных систем, что позволяет надеяться на широкое распространение цифровых антенных решеток и использование их преимуществ.

### Литература

1. *Liberti J.C., Rappaport T.S.* Smart antennas for wireless communications. – NJ: Prentice Hall PTR, USA, 1999. – 377 с.
2. *Слюсар В.И., Заблоцкий М.А.* Цифровые антенные решетки в зарубежных системах мобильной связи // Зв'язок. – 1999. – № 1. – С. 50–53.
3. Активные фазированные антенные решетки / Под ред. *Д.И.Воскресенского, А.И.Канащенкова*. – М.: Радиотехника, 2004. – 488 с.
4. *Kim M, Ichige K, Arai H.* FPGA-based DSP implementation of simple MRC beamformer Div. of Electr. & Comput. Eng., Yokohama Nat. Univ. ([http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?arnumber=985442](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=985442)).

Статья поступила  
19 ноября 2007 г.

**Орешкин Виталий Иванович** – аспирант кафедры микроэлектронных радиотехнических устройств и систем (МРТУС) МИЭТ. *Область научных интересов:* цифровая обработка сигналов и антенно-фидерные устройства.

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

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

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

С тематическими указателями статей за 1996 - 2007 гг., аннотациями и содержанием последних номеров можно ознакомиться на нашем сайте:

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

# Разработка чип-аттенюатора для поверхностного монтажа на основе распределенных резистивных структур

В.Д.Садков

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В.Н.Уткин

ОАО «НПО ЭРКОН» (г. Нижний Новгород)

Предложена топология и проведен расчет чип-аттенюаторов и адаптоаттенюаторов широкого диапазона ослаблений для поверхностного монтажа на основе распределенных резистивных структур. Приведены результаты расчетов и экспериментальных исследований как на реальных образцах разработанных изделий, так и на их крупномасштабных моделях.

Широкополосные аттенюаторы с пленочными поглощающими элементами (ПЭ) широко используются в телевизионных, радиоприемных и измерительных системах, телефонии, телеграфии, аудио- и видеотехнике для измерения и калиброванного ослабления мощности радиосигналов, взаимной развязки трактов и уменьшения вносимых ими отражений [1–4].

ПЭ аттенюаторов могут быть построены как на основе сосредоточенных (по П- и Т-схемам), так и на основе распределенных резистивных структур. Последние отличаются нечувствительностью к точечным дефектам и неоднородностям, к разбросу технологических параметров, точностью и широкополосностью, большей устойчивостью к импульсным и температурным воздействиям и в наибольшей степени отвечают растущим требованиям рынка на прецизионные пассивные элементы [2, 3].

Известные топологии ПЭ на основе распределенных резистивных структур, разработанные ранее для коаксиальных и полосковых трактов, оказываются малопригодными для построения чип-аттенюатора для поверхностного монтажа.

Контакты таких аттенюаторов по технологическим соображениям располагаются на противоположных сторонах подложки и являются охватывающими.

Расчет предлагаемой топологии ПЭ (рис.1), выполненной в виде прямоугольной резистивной пленки с удельным сопротивлением  $\rho$ , сторонами  $2a$  и  $b$ , заземленным входным и выходным контактами, проводится методом теории аналитических функций [5]. Отметим, что при различии в размерах входного и выходного контактов ( $c \neq e$ ) ПЭ наряду с ослаблением выполняет и функцию трансформатора сопротивлений (является адаптоаттенюатором) [6].

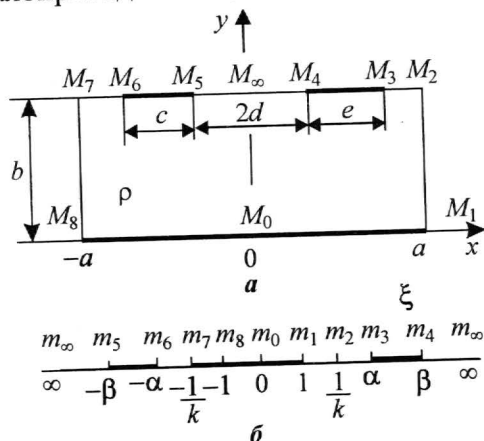


Рис.1. Топология чип-аттенюатора для поверхностного монтажа в плоскости  $z$  (а) и ее отображение на верхнюю полуплоскость  $\xi$  (б)



Отображаем прямоугольник  $M_0M_1M_2M_3M_4M_5M_6M_7M_8$  в плоскости  $z$  (см. рис.1,а) на верхнюю полуплоскость  $\xi$  (см. рис.1,б):  $\xi = \operatorname{sn}(zK/a, k)$ ,  $K'/K = b/a$ .

Здесь использованы обозначения, принятые в теории полных эллиптических интегралов и эллиптических функций Якоби [5].

Параметры  $\alpha$ ,  $\alpha_1$ ,  $\beta$  находятся из соотношений:

$$\alpha = 1/k \operatorname{sn}[(d+c)K/a, k]; \quad \alpha_1 = 1/k \operatorname{sn}[(d+c)K/a, k]; \quad \beta = 1/k \operatorname{sn}(dK/a, k).$$

Для элементов неопределенной  $[Y]$ -матрицы ПЭ размерностью  $[3 \times 3]$  получаем [3]:

$$Y_{k,1} = X_{k,1}/\rho, \quad Y_{k,n} = -X_{k,n-1}/\rho, \quad (1)$$

$$Y_{k,p} = (X_{k,p} - X_{k,p-1})/\rho, \quad X_{k,j} = \det[E_{k,j}]/\det[F], \quad (2)$$

где  $n = 3$  — число контактов;  $k = 1, 2, 3$ ;  $p = 2$ ;  $j = 1, 2, 3$ .

Элементы  $F_{k,m}$  и  $E_{k,m}$  матриц

$$[F] = \begin{bmatrix} F_{1,n-2} & F_{1,n-3} & \dots & F_{1,0} \\ F_{2,n-2} & F_{2,n-3} & \dots & F_{2,0} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{n-1,n-2} & F_{n-1,n-3} & \dots & F_{n-1,0} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$[E_{k,j}] = \begin{bmatrix} F_{1,n-2} & F_{1,n-3} & \dots & F_{1,0} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{j-1,n-2} & F_{j-1,n-3} & \dots & F_{j-1,0} \\ E_{k,n-2} & E_{k,n-3} & \dots & E_{k,0} \\ F_{j+1,n-2} & F_{j+1,n-3} & \dots & F_{j+1,0} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{n-1,n-2} & F_{n-1,n-3} & \dots & F_{n-1,0} \end{bmatrix} \quad (4)$$

выражаются следующими гиперэллиптическими интегралами:

$$F_{k,m} = (-1)^k \int_{b_k}^{a_{k+1}} \frac{t^m dt}{\sqrt{|R(t)|}}, \quad E_{k,m} = (-1)^{k-1} \int_{a_k}^{b_k} \frac{t^m dt}{\sqrt{|R(t)|}}, \quad (5)$$

где  $R(t) = (t - a_1)(t - b_1)(t - a_2)(t - b_2)(t - a_3)(t - b_3)$ ;  $a_i, b_i$  — координаты начал и концов проводников в плоскости  $\xi$ :  $a_1 = -\beta$ ,  $b_1 = -\alpha$ ,  $a_2 = -1$ ,  $b_2 = 1$ ,  $a_3 = \alpha_1$ ,  $b_3 = \beta$ .

С помощью подстановок  $t = x(b_k - a_k)/2 + (b_k + a_k)/2$  для  $E_{k,m}$  и  $t = x(a_{k+1} - b_k)/2 + (a_{k+1} + b_k)/2$  для  $F_{k,m}$  интегралы  $F_{k,m}$ ,  $E_{k,m}$  в (5) приводятся к виду

$$\int_{-1}^1 g(x) (\sqrt{1-x^2})^{-1} dx.$$

Для их вычисления используется следующая квадратная формула наивысшей степени точности:

$$\int_{-1}^1 \frac{g(x) dx}{\sqrt{1-x^2}} = \frac{\pi}{N} \sum_{n=1}^N g\left(\cos \frac{2n-1}{2N} \pi\right).$$

Количество удерживаемых в квадратурной формуле членов  $N \approx 2(b/a)^2$ . Отметим, что гиперэллиптические интегралы (5) легко вычисляются в MathCade.

[Y]-матрица ПЭ (см. рис.1,а), соответствующая заземлению контакта 3, вычисляется по (1)–(5) при вычеркивании третьей строки и третьего столбца и является [Y]-матрицей второго порядка:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{\rho} \frac{1}{\begin{vmatrix} F_{11} & F_{10} \\ F_{21} & F_{20} \end{vmatrix}} \begin{bmatrix} \begin{vmatrix} E_{11} & E_{10} \\ F_{21} & F_{20} \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} F_{11} & F_{10} \\ E_{11} & E_{10} \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} F_{11} & F_{10} \\ E_{11} & E_{10} \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} F_{11} & F_{10} \\ E_{31} & E_{30} \end{vmatrix} \end{bmatrix},$$

где определители подматриц

$$\begin{vmatrix} E_{11} & E_{10} \\ F_{21} & F_{20} \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} F_{11} & F_{10} \\ E_{11} & E_{10} \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} F_{11} & F_{10} \\ E_{31} & E_{30} \end{vmatrix}$$

согласно (1) представляют собой элементы  $X_{11}$ ,  $X_{12}$  и  $X_{13}$  соответственно.

По известной [Y]-матрице находятся параметры согласованной на входе и выходе резистивной структуры – коэффициент трансформации  $n$ , входное сопротивление  $R_{\text{вх}}$  и вносимое затухание  $q$  в дБ [4]:

$$n = R_{\text{вых}}/R_{\text{вх}} = |Y_{11}/Y_{12}|; \quad R_{\text{вх}} = \rho/[2(n\Delta Y)^{1/2}];$$

$$q = 20 \lg [(Y_{11} \cdot Y_{22})^{1/2} - (|\Delta Y|)^{1/2}] / Y_{12}.$$

Для симметричного ПЭ ( $c = e$ ) соотношения (1)–(5) позволяют получить аналитические формулы для входного сопротивления и затухания:

$$R_{\text{вх}} = \rho [K'(m_1)/K(m)/K[(m)/K(m_1)]^{1/2}, \quad (6)$$

$$q = 20 \lg \{1 + 2/(A - 1)\} \text{ (в дБ)}, \quad A = [K'(r_1)/K'(r)/(K(r_1)/K(r))]^{1/2}, \quad (7)$$

$$m^2 = \text{sn}^2(dK/a, k) \text{dn}^2[(d+c)K/a, k] / \{\text{sn}^2[(d+c)K/a, k] \text{dn}^2(dK/a, k)\}, \quad (8)$$

$$m_1^2 = k^2 \{\text{sn}^2[(d+c)K/a, k] - \text{sn}^2(dK/a, k)\} / \text{dn}^2(dK/a, k). \quad (9)$$

В частном случае  $d + c = a$  (контакты до границы  $|x| = a$ )

$$m = \text{cn}(cK/a, k), \quad m_1 = k \text{sn}(cK/a, k).$$

Выражения (8) и (9) существенно упрощаются в случае  $b/a = K'/K \ll 1$  (длинная структура) и  $b/a \gg 1$  (короткая структура). При  $b/a \ll 1$  эллиптические функции вырождаются в гиперболические и выражения (8), (9) принимают вид

$$m^2 = \text{sh}^2[\pi d/(2b)] / \text{sh}^2[\pi(d+c)/(2b)], \quad (10)$$

$$m_1^2 = \text{sh}[\pi(d+c)/(2b)] \text{sh}[\pi d/(2b)] / \text{ch}^2[\pi(d+c)/(2b)]. \quad (11)$$

Соотношения (6), (7) с  $m$  и  $m_1$  по (10); (11) полностью совпадают с приведенными в [7]. В частном случае  $d + c = a$  формулы (10), (11) еще более упрощаются:  $m_1 = \text{th}(\pi c/2b)$ ,  $m = 1/\text{ch}(\pi c/2b)$  и соотношение (6) переходит в очевидное:  $R_{\text{вх}} = \rho b/c$ , а затухание по (7) становится бесконечно большим. При  $b/a \gg 1$  для эллиптических функций имеем:

$$\operatorname{dn}[(d+c)K/a, k] \approx 1 - 8e^{-\pi b/a} \sin^2 [\pi(d+c)/(2a)],$$

$$\operatorname{dn}(dK/a, k) \approx 1 - 8e^{-\pi b/a} \sin^2 [\pi d/(2a)],$$

$$m = \{8e^{-\pi b/a} \sin^2 [\pi c/(2a)] \cdot \sin[\pi(c+2d)/(2a)]\},$$

$$m_1 = k\{\sin[\pi c/(2a)] \cdot \sin[\pi(c+2d)/(2a)]\}^{1/2}.$$

В частном случае  $d+c=a$  имеем  $m_1 = \{1 + [1 - 8e^{-\pi b/a} \sin^2 [\pi c/(2a)]]^2\}^{1/2}$ ,  $m = \cos[\pi c/(2a)]$ . При этом  $R_{\text{вх}} \rightarrow \infty$ , а  $q \rightarrow 0$ .

Зависимости нормированных входного, выходного сопротивлений и ослабления несимметричного ПЭ (адаптоаттенюатора) (см. рис.1,а) с входным и выходным контактами, доходящими до границы  $|x|=a$ , от величины  $d/a=1-c/a$  входного контакта (для выходного  $1-e/a=0,3$ ) при  $b/a=10; 5; 2; 0,5; 0,2$  приведены на рис.2. Аналогичные зависимости для симметричного ПЭ ( $c=e$ ) с входным и выходным контактами, доходящими до границы  $|x|=a$ , при тех же значениях  $b/a$  показаны на рис.3.

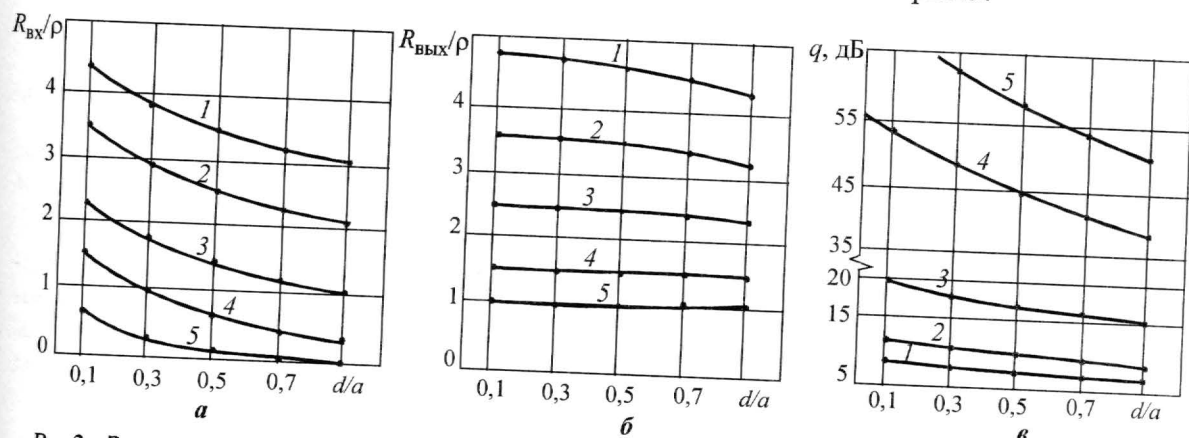


Рис.2. Зависимость нормированного входного (а), выходного (б) сопротивлений и ослабления (в) адаптоаттенюатора (см. рис.1,а) с входным и выходным контактами до границы  $|x|=a$  от величины  $d/a=1-c/a$  входного контакта (для выходного  $1-e/a=0,3$ ) при  $b/a=10; 5; 2; 0,5; 0,2$  кривые 1-5 соответственно (• - эксперимент)

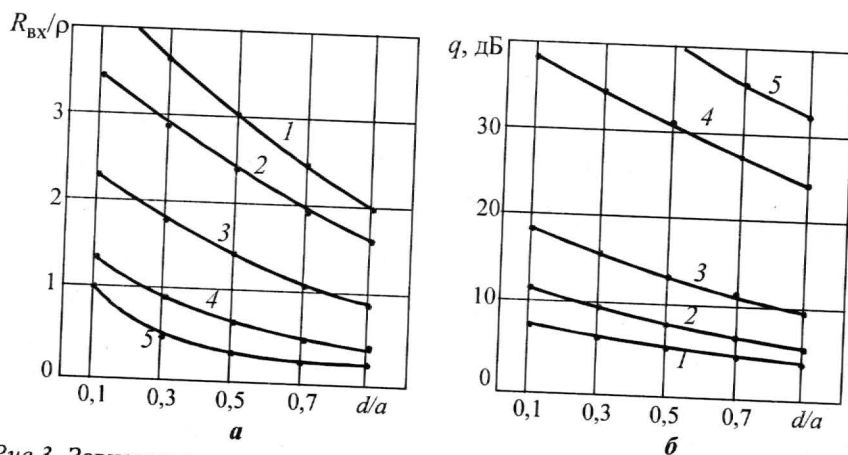


Рис.3. Зависимость нормированного входного сопротивления (а) и ослабления (б) аттенюатора с входным и выходным контактами до границы  $|x|=a$  от величины  $d/a$  при  $b/a=10; 5; 2; 0,5; 0,2$  кривые 1-5 соответственно (• - эксперимент)

Результаты экспериментальных исследований на реальных образцах ПЭ на подложках размером  $2 \times 2 \times 0,5$  мм и крупномасштабных (М 400:1) моделях из электропроводной бумаги ЭТБ-2м совпадают с расчетными в пределах погрешности измерений (1,5–2%).

### Литература

1. Садков В.Д., Прядилов С.А. Синтез тонкопленочных резистивных элементов затухания сложной геометрической формы // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1999. – № 2. – С. 76–80.
2. Белов Л.А. Аттенюаторы СВЧ-сигналов // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2006. – № 2. – С. 32–38.
3. Очеретянюк И. В. СВЧ-аттенюаторы фирмы Herley General Microwave с аналоговым и цифровым управлением // Современная электроника. – 2007. – № 1. – С. 46–48.
4. Садков В.Д. Расчет Т-образных аттенюаторных пластин для сверхширокополосных коаксиальных и плосковых аттенюаторов // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1988. – Вып. 7. – С. 24–29.
5. Широков Л.В., Ямпури Н.П., Садков В.Д. Теория аналитических функций. Аспекты приложений. – Арзамас: АГПИ, 2004. – 188 с.
6. Садков В.Д. Тонкопленочные звенья затухания с трансформацией сопротивлений // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1978. – № 7. – С. 120–123.
7. Иоссель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г. Расчет электрической емкости. – Л.: Энергия, 1976. – 308 с.

Статья поступила  
после доработки  
15 октября 2007 г.

**Садков Виктор Дмитриевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных технологий в проектировании и производстве Института радиоэлектроники и информационных технологий Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. *Область научных интересов:* моделирование пленочных структур ВЧ- и СВЧ-диапазонов.

**Уткин Валерий Николаевич** – заместитель генерального директора по развитию ОАО «НПО ЭРКОН» (г. Нижний Новгород). *Область научных интересов:* проектирование и производство пленочных структур ВЧ- и СВЧ-диапазонов.

### Информация для читателей журнала

#### «Известия высших учебных заведений. Электроника»

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

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

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

Тел.: (495) 534-62-05. Факс: (495) 530-54-29. E-mail: magazine@rnd.miee.ru

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



# МЕТОДЫ И ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 620.187:548.135

## Особенности, методика и преимущества интегрального метода исследования текстур наноразмерных кристаллитов в электронной микроскопии

### II. Практическая реализация метода<sup>\*</sup>

*С.К.Максимов*

Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)

Отмечены преимущества от реализации электронографических исследований текстур (ЭИТ) в рамках электронно-микроскопических исследованиях (ЭМИ), превращающие его, по сути, в новый метод с уникальными: локальностью, информативностью и разрешением. Он отличается прецизионным контролем осей проекций, позволяет объединить в одном эксперименте и для одного и того же объема электронографические и электронно-микроскопические исследования, выбирать исследуемые объемы не только на основе особенностей ЭМИ картин, но также на основе ЭИТ и т.д. Указано, что экспериментатор, опираясь на описанные закономерности и предложенные методики, может сам развивать варианты исследований, отвечающие исследуемому объекту и собственным навыкам.

При исследованиях текстур возникают следующие задачи: индицирование электронограммы и идентификация вещества, которому она соответствует (если это вещество не известно); выявление текстуры; определение оси текстуры; определение типа текстуры (аксиальная, планальная); определение закономерностей дисперсии. Изучение текстурированных объектов требует получения электронограмм, которые соответствуют проекциям, определенным образом наклоненным относительно оси текстуры, и поэтому требует применения гониометрических держателей образца. Желательно (но не обязательно), чтобы гониометр допускал наклоны до  $60^\circ$ , что обеспечивает получение электронограмм для сечений, локализованных в пределах конуса с углом при вершине в  $120^\circ$ . При исследовании текстур могут использоваться гониометры любого типа. Однако держатели, которые имеют ось вращения, параллельную оси микроскопа, и, как минимум, одну ось наклона, лежащую в плоскости изображения (далее механические оси), представляются более удобными.

**Расшифровка электронограмм от текстур.** Расшифровка текстур предусматривает индицирование рефлексов и, если вещество текстуры не известно, – определение этого вещества. Индицирование текстур осуществляется с помощью процедур, традиционных при индицировании точечных электронограмм. Для всех случаев идентифика-

<sup>\*</sup>Настоящая статья является продолжением работы [1]

ция начинается с определения расстояния  $r_{xyz}$  между рефлексом  $xyz$  и отражением  $000$ . Если вещество известно, то можно определить межплоскостное расстояние:

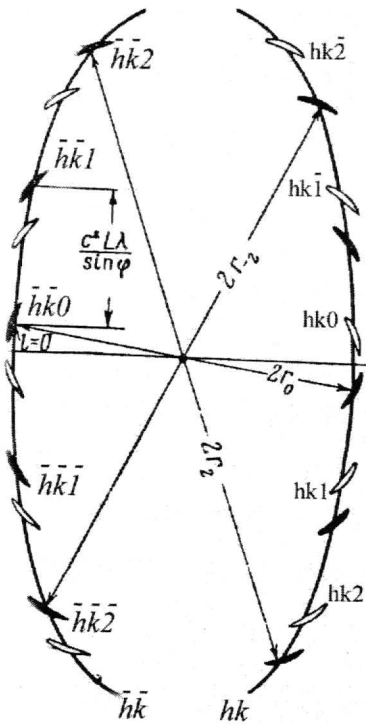
$$d_{xyz} = \frac{L\lambda}{r_{xyz}}. \quad (1)$$

Полученные значения сопоставляются с табличными значениями  $d_{xyz}$  вещества исследуемой текстуры, что позволяет подобрать индексы обрабатываемых отражений.

Индицирование электронограммы неизвестного вещества проиллюстрируем для вещества с кубической решеткой. Найдем отношения  $\frac{r_i}{r_j}$  и подберем индексы отражений  $h_i k_i l_i, h_j k_j l_j$ , для которых

$$\frac{r_j}{r_i} = \frac{\sqrt{h_i^2 + k_i^2 + l_i^2}}{\sqrt{h_j^2 + k_j^2 + l_j^2}}. \quad (2)$$

Во всех случаях для определения расстояний  $r_i, r_j$  дифракционный вектор следует проводить в фокальную точку рефлекса, т.е. точку, в которой он пересекается соответствующей кривой (эллипсом, параболой, гиперболой), как показано на рисунке. Электронограмма соответствует кристаллу с косоугольной элементарной ячейкой. Ось текстуры совпадает с осью  $z$ . Вдоль эллиптических кривых лежат рефлексы с постоянными  $hk$  и переменными  $l$ . Вследствие косоугольности решетки рефлексы смещены относительно нулевой линии и число рефлексов удвоено вследствие существования плоскости симметрии. На каждой ветви эллипса лежат истинные рефлексы  $xyz$  (сплошные изображения) и отражения рефлексов  $hk\bar{l}$  (контурные изображения). Показаны правила измерения  $r_i, r_j$ . Однако при определении фокальной точки могут возникать сложности. Во-первых, сечение может проходить только через часть рефлекса, при этом фокальная точка лежит ближе к «срезке» дугообразного рефлекса или вообще отсутствует на электронограмме. Во-вторых, для электронограмм, на которых рефлексы лежат вдоль гипербол, необходимо учитывать направления, которым соответствуют эти гиперболы. Поэтому один и тот же рефлекс, лежащий в точке пересечения кривых, может иметь индексы, отвечающие разным комбинациям  $xyz$  (см. рис.12 [1]).



Особенности электронограмм при эллиптическом расположении отражений

**Выявление текстурированности объекта.** Для доказательства существования текстуры достаточно выявить на электронограмме отражения в форме дуг или расположение рефлексов вдоль дуг эллипсов, парабол или гипербол. Особенно сложно выявлять текстурированность для двух крайних случаев: если степень текстурированности мала и электронограммы близки к электронограммам поликристаллов; если существует ограниченная текстура, т.е. текстура с выделенным направлением, лежащим в выделенной плоскости [2]. Дугообразный харак-

тер рефлексов трудно выявляется также, если дисперсия текстуры мала, а ось текстуры случайным образом образует с осью проекций углы, превышающие  $70^\circ$ . Эллипсы, параболы, гиперболы могут быть слабо выражены для высокосимметричных кристаллов в силу малой плотности узлов обратного пространства. Оба эти эффекта прослеживаются на рис.12 [1], на котором дугообразность рефлексов почти не заметна, а гиперболы обнаруживаются только при тщательном исследовании дифракционной картины. Параболы и гиперболы следует выявлять путем изучения расположения рефлексов, лежащих в обратной решетке на направлениях, наиболее плотно заселенных рефлексами и не проходящих через узел  $000$  (см. рис.12 [1]).

Кроме того, следует проверять ряды рефлексов, которые потенциально могут быть слоевыми линиями (рис.8 [1]). Слойные линии смещены относительно друг друга вдоль направления проекции оси текстуры на плоскость проекций. Изменяя наклон кристалла путем вращения вокруг направления предполагаемых слоевых линий, можно перейти к проекциям, приближающимся к проекции  $[xyz]$ . Для таких проекций дугообразность рефлексов выражена максимально, а гиперболы преобразуются в эллипсы с малым эксцентриситетом.

**Определение оси текстуры.** Простейший вариант определения оси текстуры связан с получением двух сечений, на электронограммах которых наблюдаются эллипсы, причем малые оси этих эллипсов не лежат на одном направлении. Точность определений оси текстуры зависит от того, насколько точно определены направления малых осей, поэтому желательно, чтобы направления малых осей соответствовали осевым прямым с большим числом рефлексов (систематическому ряду отражений). Причем оси должны проходить через фокальные точки рефлексов (см. рисунок). Существование систематического ряда еще не означает, что ось проекций не наклонена относительно оптической оси микроскопа в плоскости, проходящей через малую ось и ось проекций, поскольку узлы обратного пространства представляют собою сферические пояса. Оптимальную ориентацию оси проекций легче получить с помощью дефлектора темного поля.

После того как определены направления малых осей двух эллипсов, направление оси текстуры для агломерата из кубических кристаллов может быть определено на основе системы уравнений:

$$uh_1 + vk_1 + wl_1 = 0, \quad (3a)$$

$$uh_2 + vk_2 + wl_2 = 0. \quad (3b)$$

где  $uvw$  – индексы оси текстуры;  $h_i k_i l_i$  – индексы направлений малых осей.

Альтернативой описанному методу определения оси текстуры является метод, в котором она ищется на основе направлений больших осей двух или более эллипсов, поскольку направления больших осей эллипсов отвечают проекциям оси текстуры на плоскость сечения.

**Определение типа текстуры и особой плоскости для планальной текстуры.** Особые плоскости планальной текстуры  $\{uvw\}$  пересекают плоскость  $(xyz)$  в каждом кристаллите по направлению  $XYZ$ , индексы которого отвечают уравнениям:

$$Xu + Yv + Zw = 0, \quad (4a)$$

$$Xh + Yk + Zl = 0. \quad (4b)$$

Поэтому при изменениях плоскостей сечения на электронограммах должны систематически возникать осевые прямые, отвечающие условию

$$Xx + Yy + Zz = 0. \quad (5)$$

Если на электронограммах для сечений, пересекающих плоскость ( $xyz$ ) по разным направлениям, наблюдаются осевые прямые с отражениями от плоскостей, в которых лежит одно и то же направление  $XYZ$ , то текстура имеет планальный характер. Отсутствие систематического появления этих прямых говорит об осевом характере текстуры. При аксиальной текстуре могут возникать осевые прямые с отражениями от плоскостей, в которых лежит направление  $[xyz]$ .

Для планальной структуры направление  $\langle uvw \rangle$  соответствует проекции направления малой оси на плоскость ( $xyz$ ). Чтобы определить направление  $\langle uvw \rangle$ , необходимо первоначально найти плоскость, в которой лежат направления оси проекций и малой оси эллипса. Индексы этой плоскости определяются с помощью двух уравнений:

$$xh + yk + zl = 0, \quad (6a)$$

$$xX + yY + zZ = 0, \quad (6b)$$

где  $xyz$  – индексы искомой плоскости;  $XYZ$  – индексы направления малой оси. Далее направление  $\langle uvw \rangle$  находится как направление пересечения плоскостей ( $xyz$ ) и  $(hkl)$ :

$$uh + vk + wl = 0, \quad (7a)$$

$$ux + vy + wz = 0. \quad (7b)$$

**Проверочные операции.** Рефлексы на электронограммах соответствуют сечениям сферических поясов. Сечения могут не проходить через центр рефлекса. Вектора, проведенные из отражения  $000$  к отражениям  $xyz$ , могут быть проведены не в фокальные точки рефлексов. Все это может приводить к ошибкам при индексации отдельных рефлексов, оси текстуры и особой плоскости. Поэтому (далее будут указаны приемы, позволяющие уменьшать ошибки этих операций) крайне желательна проверка результатов индексации.

**Проверка правильности индексации оси текстуры и отражений.** Угол между плоскостью сечения и обратной решеткой текстуры  $\phi$  определяется по формуле (5) [1] на основе координат в пространстве электронограммы  $\eta$  и  $\xi$ , связь которых с геометрией электронограммы иллюстрируется рис.4, 5 [1]. Угол  $90^\circ - \phi$  – это угол между направлениями проекции и большой оси эллипса. Для получения проекции, в которой направление большой оси четко определено, можно воспользоваться закономерностями осевых прямых и зафиксировать ситуацию, при которой два рефлекса  $h'_i k'_i l'_i$  и  $h''_i k''_i l''_i$ , отображающие один и тоже узел обратного пространства текстуры  $h_i k_i l_i$ , сливаются в один рефлекс  $h_i k_i l_i$ , локализованный в точке пересечения большой оси и эллиптической кривой. Для этой ситуации индексы  $h_i k_i l_i$  являются также индексами направления большой оси эллипса и угол между направлением  $h_i k_i l_i$  и осью текстуры определяется по формуле

$$\psi = \frac{uh + vk + wl}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \cdot \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}, \quad (8)$$

где  $uvw$  – индексы оси текстуры;  $hkl$  – индексы направления большой оси.

При равенстве углов  $\psi$  и  $90^\circ - \phi$  индцирование электронограммы и индексы оси определены правильно. Эта операция подтверждает также правильность индцирования отдельных рефлексов.

В соответствии с закономерностями формирования электронограмм на электронограммах косых текстур возникает плоскость симметрии, отсутствующая в решетке кри-



сталлитов. Для неортогональных решеток на некоторых проекциях на одной и той же ветви эллипса могут лежать и истинные рефлексы  $hуz$ , и отражения рефлексов с противоположными знаками индексов, обусловленные влиянием этой плоскости (см. рисунок). При этом на одной ветви эллипса лежит рефлекс  $hуz$ , а на противоположной в позиции, симметричной относительно большой оси эллипса, находится отражение рефлекса  $\overline{hуz}$ . Эту пару рефлексов можно принять за пару отражений, лежащих на разных осевых прямых и отвечающих одному и тому же узлу обратной решетки. Чтобы различить две ситуации, необходимо наклонять образец вокруг малой оси эллипса. Два рефлекса  $x'y'z'$  и  $x''y''z''$ , отвечающие одному и тому же узлу обратной решетки  $hуz$ , должны скользить вдоль ветвей эллипса и до исчезновения сойтись в точке пересечения большой оси эллипса и эллиптической кривой. Отражения рефлексов  $h\overline{k}\overline{l}$  исчезают вместе с породившими их рефлексами при выходе из отражающего положения плоскостей  $\{h\overline{k}\overline{l}\}$ .

**Проверка правильности индексации особой плоскости планальной текстуры.** Осевая прямая, отвечающая отражениям от особых плоскостей  $\{uvw\}$ , также является особой. Для нее невыполнимо условия  $k^2 > 0$ , при котором рефлексы, лежащие на этой прямой, исчезают. С приближением к нормальной проекции угловая протяженность рефлексов, лежащих на этой прямой, возрастает и на нормальной проекции они трансформируются в окружности, что позволяет не только доказать планальный характер текстуры, но также определить индексы особой плоскости.

Если ось текстуры любого типа совпадает с осью проекции, то электронограммы имеют кольцевой характер и рефлексы отвечают плоскостям, параллельным оси проекций. Для текстур равновероятность ориентаций кристаллитов нарушена, поэтому отношения интенсивностей отражений не соответствуют табличным. Для аксиальной текстуры повышенную интенсивность имеют отражения от плоскостей, для которых выполняется условие

$$xh + yk + lz = 0, \quad (8)$$

а для планальных текстур – различные порядки отражения  $uvw$ . Поэтому изучение интенсивностей различных отражений на кольцевых электронограммах позволяет определить тип текстуры и особую плоскость планальной текстуры. Так, текстура на рис.7,а [1] является аксиальной, поскольку интенсивные кольца не представляют собой разные порядки одного отражения.

Тип текстуры можно проверить с помощью гипербол. На гиперболах для планальных структур должны преобладать отражения от плоскостей, в которых лежит направление  $\langle uvw \rangle$ , а на кривых для аксиальной структуры – от плоскостей, в которых лежит направление  $[h\overline{k}\overline{l}]$ .

Для проверки правильности определения особой плоскости для планальной структуры достаточно сопоставить результаты определений этой плоскости по двум проекциям.

**Изучение дисперсии.** Для того чтобы наиболее просто определить дисперсию аксиальной текстуры, следует выбрать рефлекс  $hуz$ , для которого вектор  $\mathbf{H}_{hуz}$  перпендикулярен малой оси, и вывести его на большую ось, разворачивая образец с помощью оси наклона. Этот момент можно точно определить, измеряя угол  $\omega$  между двумя осевыми прямыми, отвечающими одному и тому же направлению в обратной решетке, величина которого определяется формулой (10) [1]:  $\cos\omega = 2\cos\psi/\sin\varphi$ , где  $\psi$  – угол между вектором  $\mathbf{H}_{hуz}$  и осью текстуры. Угол  $\Delta_{hуz}$  между векторами, направленными из рефлекса к крайним точкам рефлекса  $hуz$ , характеризует дисперсию.

Истинное значение дисперсии может быть найдено по формуле  $\cos\Delta_{акс} = \cos\frac{1}{2}\Delta_{hуz} \cdot \sin(90^\circ - \varphi)$ .

Аналогично может быть определена дисперсия планальной текстуры. Однако в этом случае следует использовать угол, отвечающий азимутальной протяженности рефлекса  $h_{yz}$ , лежащего на направлении малой оси:  $\cos \Delta_{пл} = \cos \frac{1}{2} \Delta_{h_{yz}} \cdot \sin (90^\circ - \rho)$ ,

где  $\rho$  – угол между направлениями малой оси и  $[uvw]$ .

**Особенности и преимущества исследований текстур в колонне электронного микроскопа.** При реализации метода косых текстур в колонне электронного микроскопа сохраняются все преимущества этого метода. В первую очередь, возможность непосредственной интерпретации дифракционных картин без их обработки с помощью стереографических проекций. Кроме того, обнаружение текстур и первичные оценки их закономерностей могут осуществляться визуально уже на стадии получения электронограмм. Однако в этих исследованиях возможны ошибки. Метод предусматривает использование «свободных» объектов, например пленочных образцов, отделенных от подложки. Релаксация напряжений, возникающих в процессе отделения, может приводить к изгибам такого образца, что отразится на дифракционных картинах. Поэтому при исследованиях текстур следует, при необходимости, использовать фиксацию плоского состояния, например расположение объекта между двумя сеточками.

Предложенный путь идентификации текстур охватывает только часть возможных методик, вытекающих из закономерностей, рассмотренных в [1]. В частности, практически не используются закономерности формирования слоевых линий или гиперболических приемов, отнесенные к проверочным, могут использоваться как основные и т.д. Экспериментатор может предлагать свои методики изучения текстур, основываясь на закономерностях косых сечений и используя подходы настоящей работы как образец.

Реализация метода косых текстур в микроскопе позволяет объединить в одном эксперименте и для одного и того же объема изучение текстур посредством двух методов: электронно-микроскопического, обеспечивающего информацию на уровне отдельных кристаллитов, и электронографического, дающего информацию об интегральном строении текстур. Такое объединение исключает необходимость статистической обработки результатов, полученных двумя методами, для их сопоставления и делает возможным целенаправленный выбор объемов, на которых проводятся исследования. При этом выбор объемов может осуществляться на основе как электронно-микроскопических, так и электронографических режимов работы. Эти возможности сами по себе делают перспективным изучение текстур в колонне электронного микроскопа. Однако конструктивные особенности современных микроскопов позволяют также повысить разрешение, локальность и информативность этих исследований.

При реализации метода косых текстур в электронном микроскопе возможны два режима. Первый – освещающий пучок распространяется вдоль оси микроскопа и косые сечения достигаются исключительно посредством наклонов образца с помощью гониометрического держателя. Этот режим можно условно назвать «светлопольным» и он идентичен режиму получения косых текстур в электронографе. Второй – для получения косых текстур наряду с наклонами образца посредством гониометра используются наклоны первичного электронного пучка с помощью дефлектора темного поля. Этот режим условно назовем «темнопольным». В «светлопольном» режиме образец наклоняется таким образом, чтобы нормаль к плоскости сечения  $h_{yz}$  легла на ось микроскопа. В «темнопольном» – ось проекций совмещается с направлением  $h_{yz}$ , что реализуется не наклоном образца, а наклоном освещающего пучка. Наличие дефлектора эквивалентно появлению у гониометра двух дополнительных степеней свободы.

Наклон освещающего пучка в «темнопольном» режиме осуществляется перемещением дифракционной картины относительно оптической оси микроскопа. При этом в каждый момент времени направление, которое соответствует точке дифракционной картины, находящейся на оптической оси микроскопа (на отъюстированном микроскопе ось проходит через центр экрана), является направлением проекции. Угол наклона текущей проекции относительно оптической оси и направление наклона определяются величиной и ориентацией вектора, соединяющего узел  $000$  с центральной точкой. Оператор контролирует в темнопольном режиме одновременно и оси проекций и изменения геометрии электронограмм, обусловленные изменениями этих осей и отражающие закономерности текстуры. Для микроскопа Philips CM 30 работа с дефлектором позволяет контролировать изменения проекций, равные  $0,01 \text{ \AA}^{-1}$  (порядка  $1'$ ), что многократно увеличивает точность измерения характеристик текстуры.

Недостатком «темнопольного» режима являются ограничения на максимальный угол наклона, на который рассчитан дефлектор и который не превышает нескольких градусов. Поэтому рекомендуется комплексный режим, при котором основной наклон осуществляется с помощью гониометра, а устройство темного поля используется на заключительном этапе для получения максимально точных проекций. Можно предложить следующий вариант проведения исследований в комплексном режиме; наклоны осуществляются с помощью гониометра, а дефлектор используется только для корректировки этих наклонов. При этом все наклоны образца с помощью гониометра осуществляются при отключенном дефлекторе, а еще лучше при дефлекторе, переведенном в состояние «нулевого возбуждения». В обоих случаях падающий пучок параллелен оси микроскопа.

Чтобы оптимизировать ориентацию малой оси эллипса, необходимо с помощью гониометра получить систематический ряд отражений, отвечающих этой оси, и совместить этот ряд с осью наклона гониометра. Однако даже наличие систематического ряда не гарантирует, что направление малой оси проходит через экваториальную линию этого пояса. Поэтому надо найти фокальную точку рефлекса (см. рисунок). В этих целях следует наклонять первичный пучок с помощью дефлектора в двух плоскостях, одна из которых проходит через направление малой оси, а другая перпендикулярна этой оси. Эта процедура позволит определить центральную (фокальную) точку рефлекса по двум сечениям и внести корректировку в угол наклона, создаваемый гониометром. Подобную процедуру можно выполнить также для малой оси другого эллипса, а если это нарушит юстировку первой оси, повторять эту процедуру, пока ориентация обеих осей не будет признана оптимальной. После этого ось текстуры будет выставлена с максимальной точностью.

Комплексная процедура достаточно трудоемка. Она вряд ли оправдана при определениях оси текстуры и плоскости планальной текстуры. Однако позволяет изучить дисперсию текстур с максимальной точностью, сопоставить разные рефлексы в идентичных условиях и получить информацию о симметрии или асимметрии дисперсии.

Единственным методом улучшить локальность исследований в электронографе является уменьшение размеров освещенной области, что достигается фокусировкой освещающего пучка электронов. Однако при этом возрастет его расходимость, что снижает разрешение дифракционной картины. В электронной микроскопии размер области, которой соответствует дифракционная картина, лимитируется размерами селективной диафрагмы и не зависит от размеров освещенной области. Электронограммы в электронном микроскопе могут формироваться в практически параллельных электронных лучах, и максимального разрешения можно добиваться при максимальной локальности.

Минимальные размеры селективных областей зависят от аберраций электронных линз, которые нарушают соответствие между ними и дифракционной картиной. Для рутинных исследований в микроскопах рекомендуются селективные диафрагмы, ограничивающие размеры селективной области 0,5 мкм. Смещения областей, которым реально соответствует тот или иной рефлекс, относительно селективной области зависят от брэгговского угла этого рефлекса и юстировки микроскопа. Эти смещения легко установить, если сопоставить «светлопольное» изображение селективной области и ее «темнопольные» изображения в конкретных рефлексах.

При определениях оси текстуры, ее типа, индексов особой плоскости можно рекомендовать использовать селективные области, для которых смещения для всего диапазона рефлексов, используемых в исследованиях, не превышают, например 10% от диаметра селективной области. Собственный опыт автора (микроскоп Philips CM 30 и отражения с  $d_{\text{хуэ}} > 0,1$  нм) показывает, что для рутинных измерений могут использоваться диафрагмы, обеспечивающие минимальный размер селективной области 0,2–0,4 мкм. Второй способ гораздо более трудоемок, но обеспечивает достижение уникальных по локальности результатов, например при исследованиях дисперсии. Этот метод предназначен для работы с конкретными рефлексами и осуществляется посредством смещений селективной диафрагмы с таким расчетом, чтобы рассеивающая область при работе с используемым рефлексом совпадала с селективной областью в проходящем пучке. В этом методе можно добиться локальности не хуже 0,07–0,1 мкм.

Высокий уровень локальности, который может быть обеспечен при реализации метода косых текстур в колонне электронного микроскопа, позволяет также надеяться на решение проблемы, в отношении которой в настоящее время не было даже попыток ее постановки. Современные методы препарирования [3] позволяют получать образцы, в которых срез пересекает толщу объекта наискосок. При предельной локальности и угле среза  $\approx 6^\circ$  можно рассчитывать на исследование дисперсии с разрешением по толщине 10 нм.

### Литература

1. **Максимов С.К.** Особенности, методика и преимущества интегрального метода исследования текстур наноразмерных кристаллитов в электронной микроскопии. I. Физические основы метода // Изв. вузов. Электроника. – 2008. – № 3. – С. 85–84.
2. **Пинскер З.Г.** Дифракция электронов. – М.: Изд-во АН СССР, 1949. – 429 с.
3. **Gnauck.** Accuracy of Crossbeam Technology // The Nanotech Journal. – 2005. – N 1. – P. 1–5.

Статья поступила  
20 июня 2007 г.

**Максимов Сергей Кириллович** – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории электронно-микроскопических исследований МИЭТ. *Область научных интересов:* закономерности дифракции и электронно-микроскопического контраста, применение электронной микроскопии к исследованиям материалов твердотельных приборов, фазовые превращения, дефекты кристаллической структуры.



# Исследование влияния модификации поверхности микрорезонаторов на их частотные свойства

В.Д.Вернер, Г.Н.Гайдуков, П.С.Пагин

Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)

Рассмотрено влияние гетерослоя на упругие постоянные и поверхностное натяжение в наноэлектромеханических системах. Проведено количественное сравнение этих эффектов на примере резонатора из кремния. Показано, что представленные результаты лежат в диапазоне возможного экспериментального наблюдения.

Микрокантилеверные резонаторы находят все более широкое применение практически во всех областях техники и в первую очередь в микроэлектронике [1]. Одним из важных применений резонаторов является возможность их использования в качестве высокоточных сенсоров [2], пригодных, как показывают прогнозы, в недалеком будущем для детектирования отдельных молекул [3]. Основной принцип, на котором построено применение таких сенсоров, – это сдвиг резонансной частоты вследствие изменения состояния поверхности [4]. Это может быть вызвано не только добавлением слоя или отдельных частиц вещества, но и изменением физических свойств резонатора из-за изменения состояния поверхности [5, 6].

На протяжении двух последних десятилетий делались попытки описать систему, состоящую из резонатора с нанесенным на него слоем вещества, на разных уровнях рассмотрения вплоть до учета поведения отдельных атомов [7]. Однако на всех уровнях можно выделить два основных эффекта: 1) изменение жесткости самой микрокантилеверной системы; 2) изменение поверхностного напряжения.

Общепринято второй эффект описывать как изменение жесткости системы вследствие неравномерного нанесения молекул на поверхность резонатора [7, 8], а первый – вследствие различия свойств упругости резонаторной балки и нанесенного слоя [9].

Предлагалось рассматривать поверхностное напряжение как внешнюю осевую силу, приложенную к резонатору, однако позже такой подход был признан несостоятельным [10]. В работе [5] рассматривают поверхностное напряжение как следствие напряжений верхнего и нижнего слоя.

В настоящей работе показана возможность использования изменения свойств упругости и неравномерного распределения нанесенного слоя по поверхности, а также влияние отдельного слоя на поверхностное напряжение микрорезонатора, в качестве сенсора на основе микрорезонатора.

**Сдвиг частоты, обусловленный упругими свойствами нанесенного слоя.** Схематичное изображение резонатора с нанесенным слоем показано на рис.1, где  $L$  – длина;

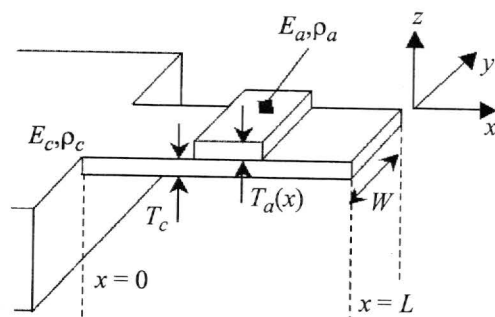


Рис.1. Схематичное изображение кантилевера, с нанесенным слоем

$W$  – ширина;  $T_c$  – толщина балки, закрепленной на одном конце, поперечное отклонение  $u(x, t)$  происходит вдоль оси  $z$ , начало оси  $x$  – в точке закрепления балки;  $T_a(x)$  – толщина нанесенного слоя;  $E_a$  и  $E_c$  – модули Юнга слоя и кантилевера соответственно;  $\rho_a$  и  $\rho_c$  – их плотности.

В предположении, что нанесенный слой равномерно распределен по ширине балки, уравнение движения балки без учета вращательных и продольных мод можно записать [6]:

$$W(\rho_c T_c + \rho_a T_a(x)) \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( D(x) \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} \right) = 0, \quad (1)$$

где  $D(x)$  – жесткость резонатора на изгиб, которая определяется следующим выражением [9]:

$$D(x) = \frac{D_0}{1 + (E_a / E_c)(T_a(x) / T_c)} \{ 1 + (E_a / E_c)^2 (T_a(x) / T_c)^4 + \\ + 2(E_a / E_c)(T_a(x) / T_c)[2 + 3T_a(x) / T_c + 2(T_a(x) / T_c)^2] \}.$$

Жесткость резонатора равна:  $D_0 = (1/12)E_c W T_c^3$ . Уравнение (1) не решается аналитически в общем случае, поэтому для анализа решений применяется метод баланса работы и энергии [6]. Пусть колебания системы с нанесенным слоем несильно отличаются от собственных колебаний:  $u(x, t) = A \psi_n(x) \cos(\omega_n t + \phi)$ , где  $\psi_n(x)$  – функция, описывающая решение для  $n$ -й собственной моды свободного резонатора;  $\omega_n$  –  $n$ -я собственная мода рассматриваемого резонатора;  $A$  и  $\phi$  – произвольные значения фазы и амплитуды. Среднее значение для работы производимой резонатором во время изгиба и кинетическая энергия за один цикл колебаний задаются соотношениями [6]:

$$\langle W_s \rangle = \frac{A^2}{4} \int_0^L D(x) (\psi_n''(x))^2 dx; \quad (2a)$$

$$\langle W_k \rangle = \frac{W A^2}{4} \omega_n^2 \int_0^L (\rho_c T_c + \rho_a T_a(x)) \psi_n^2(x) dx. \quad (2б)$$

Приравняв уравнение (2a) и (2б), получим выражение для резонансной частоты:

$$\omega_n = \frac{(1/L^3) \int_0^L D(x) \phi_n^2(x) dx}{m_c \int_0^L (1 + (\rho_a / \rho_c)[T_a(x) / T_c]) \psi_n^2(x) dx}, \quad (3)$$

где изгиб выражен как  $\phi_n(x) = L^2 \psi_n''(x)$ , а форма собственных мод задается выражением

$$\psi_n(x) = \sin(\beta_n x / L) - \sinh(\beta_n x / L) + \frac{\sin \beta_n + \sinh \beta_n}{\cos \beta_n + \cosh \beta_n} [\cosh(\beta_n x / L) - \cos(\beta_n x / L)],$$

где собственные значения  $\beta_n$  удовлетворяют выражению

$$1 + \cos \beta_n \cosh \beta_n = 0.$$

Если рассматривать однородный резонатор без какой-либо пленки, тогда из (3) можно получить хорошо известное выражение для первой моды:

$$\omega_{n1} = \beta_1^2 \frac{T_c}{2L^2} \sqrt{\left(\frac{E}{3\rho_c}\right)}.$$

Здесь  $\beta_1 = 1,8751$ .

Сравним выражение (3) с выражением для частоты многослойного резонатора, колеблющегося вдоль оси  $z$  [9]:

$$\omega_n' = \frac{\beta_n^2}{L^2} \left( \frac{\int_h E(z - z_0)^2 dz}{\sum_{i=1}^N (T_i \rho_i)} \right)^{1/2}.$$

Здесь  $z_0$  — координата нейтральной оси для двухслойного резонатора:

$$z_0 = \frac{E_c T_c^2 + E_a (T_c + T_a)^2 - E_a T_c^2}{2(E_c T_c + E_a T_a)}$$

и  $E = E_c$ , если  $0 < z < T_c$ ,  $E = E_a$ , если  $T_c < z < T_a + T_c$ . Результаты для резонатора из кремния ( $L = 5$  мкм,  $W = 0,1$  мкм) с пленкой из германия представлены в таблице.

Очевидно, что формула (3) работает только тогда, когда толщина пленки на порядок меньше толщины резонатора.

Для равномерного распределения пленки по поверхности резонатора уравнение (3) приводит к относительному сдвигу частоты  $\omega_{0n}$  моды в виде

$$\frac{\omega_n - \omega_{0n}}{\omega_{0n}} \cong \alpha_1 \left( \frac{T_a}{T_c} \right) + \alpha_2 \left( \frac{T_a}{T_c} \right)^2. \quad (4)$$

$$\text{Здесь } \alpha_1 = \frac{1}{2} \left( 3 \frac{E_a}{E_c} - \frac{\rho_a}{\rho_c} \right); \quad \alpha_2 = \frac{3}{8} \left[ \left( \frac{\rho_a}{\rho_c} \right)^2 + 2 \frac{E_a}{E_c} \left( 4 - \frac{\rho_a}{\rho_c} \right) - 7 \left( \frac{E_a}{E_c} \right)^2 \right].$$

В случае, когда толщина нанесенного слоя много меньше толщины самого резонатора, относительный сдвиг частоты определяется константой  $\alpha_1$ . Сдвиг является результатом проявления двух эффектов, противоположных по характеру действия на резонансную частоту, а именно эффектов добавленной массы (второй член в (4)) и изменения жесткости системы (первый член в (4)), при этом величина относительного сдвига пропорциональна  $T_a/T_c$ . С уменьшением размеров резонатора толщина пленки сравнивается с толщиной кантилевера, что приводит к квадратичной зависимости сдвига частоты от относительной толщины.

Значения точного решения и приближенного

$T_a/T_c$	$\omega_n$ , МГц	$\omega_n'$ , МГц
0,01	3,03439	3,08015
0,1	3,03437	3,08013
0,5	3,59724	2,61857

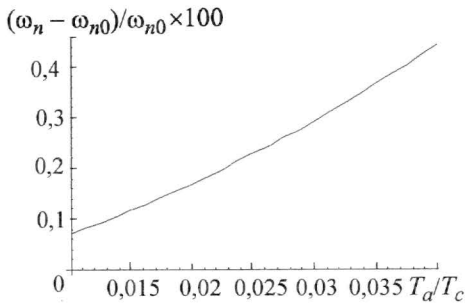


Рис.2. Зависимость сдвига резонансной частоты от толщины слоя из германия, нанесенного равномерно

На рис.2 показан сдвиг частот в зависимости от относительной толщины, вычисленный из уравнения (4) для резонатора из кремния и нанесенного слоя из германия. Видно, что эффект измененной жесткости преобладает над эффектом добавленной массы тем больше, чем меньше толщина пленки (если бы преобладал эффект добавленной массы, то смещение было бы отрицательным).

**Сдвиг частоты, обусловленный поверхностным напряжением.** Под термином «поверхностное напряжение» подразумеваются напряжения в приповерхностном слое резонатора, которые

включают в себя чистое поверхностное напряжение (например, свободной поверхности), напряжение между поверхностями, а также напряжение внутри очень тонкого слоя нанесенного материала.

Следуя [5], рассмотрим разницу поверхностных напряжений  $\Delta\tau = \tau_u - \tau_l$ , где индексы  $u$  и  $l$  относятся к напряжению на верхней и нижней поверхности соответственно (рис.3). Для простоты тензор поверхностного напряжения будем считать диагональным в соответствии с изотропными свойствами материала. В этом случае в первом приближении для напряжения можно записать

$$\tau_u = a_u + b_u \varepsilon_u, \quad \tau_l = a_l + b_l \varepsilon_l,$$

где  $a_u, a_l$  – часть поверхностного напряжения, не зависящая от деформации;  $b_u, b_l$  – константы, связанные с поверхностным напряжением;  $\varepsilon_u, \varepsilon_l$  – поверхностная деформация, измеренная от состояния до нанесения слоя. Разность напряжений выражается как:

$$\Delta\tau = \Delta\tau^0 + \Delta\tau^1,$$

где  $\Delta\tau^0 = a_u - a_l$  и  $\Delta\tau^1 = b_u \varepsilon_u + b_l \varepsilon_l$ .

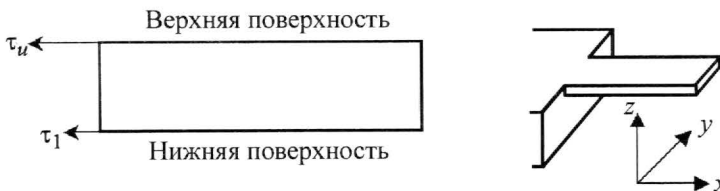


Рис.3. Схематическое изображение незакрепленной части кантилевера

Таким образом, влияние поверхностного напряжения на резонансную частоту можно описать через величины  $\Delta\tau^1$  и  $\Delta\tau^0$ .

Если учитывать только влияние  $\Delta\tau^0$ , то результирующий момент сил  $M$ , действующий на любую плоскость поперечного сечения резонатора, будет равен:

$$M(x, t) = -E_c I \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} + \frac{T_c}{2} \Delta\tau^0, \quad (5)$$

где  $I = T_c^3 / 12$  – момент инерции. Заметим, что  $\Delta\tau^0$  порождает постоянный сгибающий момент. Уравнение движения для кантилевера примет вид:



$$E_c I \partial^4 u(x, t) / \partial x^4 + \rho_c A \partial^2 u(x, t) / \partial t^2 = 0.$$

Здесь  $\rho_c A$  – масса на единицу длины, где  $A = WT_c$ . Так как величина  $\Delta\tau^0$  не входит в коэффициенты уравнения движения, то поверхностное напряжение, не зависящее от деформации, не влияет на резонансные частоты резонаторной балки.

Рассмотрим вторую составляющую поверхностного напряжения  $\Delta\tau^1$ , зависящую от деформации. Изгибающий момент в этом случае примет вид:

$$M(x, t) = - \left[ 1 + \frac{3}{E_c T_c} (b_l + b_u) \right] E_c I \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} + \frac{T_c}{2} \Delta\tau^0. \quad (6)$$

Из уравнения (6) видно, что изгибающий момент представляется аналогично (5), если ввести эффективный модуль Юнга:

$$E^* I = \left[ 1 + 3 \frac{b_l + b_u}{E_c T_c} \right] E_c I.$$

Изменение резонансной частоты, вызванное изменением поверхностного напряжения, можно записать как:

$$\frac{\omega_n^2 - \omega_{n0}^2}{\omega_{n0}^2} = \frac{E^* - E_c}{E_c} = 3 \frac{b_l + b_u}{E_c T_c} \approx 2 \frac{\Delta\omega}{\omega_{0n}}. \quad (7)$$

Заметим, что эффект, вызванный поверхностным напряжением, зависит от размера  $T_c$  структуры, а также, что знак величины  $\Delta\omega$  может быть положительным или отрицательным в зависимости от знака  $(b_l + b_u)$ .

Используя для величин  $b_l$ ,  $b_u$  значения, приведенные в [5] для пленки из германия на кремнии, представим графически выражение (7) на рис.4. Из графика на рис.4 следует, что влияние поверхностного напряжения на резонансную частоту уменьшается по мере уменьшения толщины нанесенной пленки.

**Сдвиг частоты, обусловленный нанесенным атомным кластером.** Предположим, что слой нанесенных молекул шириной  $\Delta x$  находится в точке  $x_0$  (см. рис.1). На рис.5 показана зависимость относительного сдвига первой резонансной моды от толщины атомного кластера из германия и кантилевера из кремния для случая  $\Delta x/L = 0,1$  и  $x_0 = 0,45L$ . Вычисления проводились с помощью формулы (3). Из рисунка видно, что сдвиг резонансной частоты, так же как и в случае с полным покрытием, имеет нелинейную зависимость.

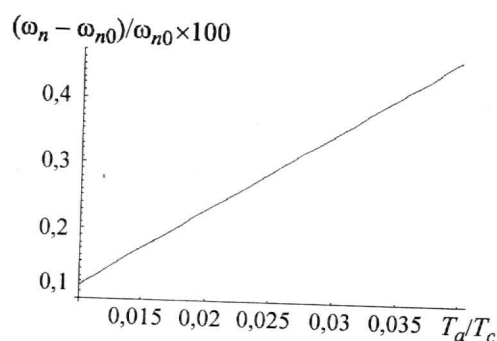


Рис.4. Относительное изменение резонансной частоты в результате влияния поверхностного напряжения для нанесенного слоя из германия

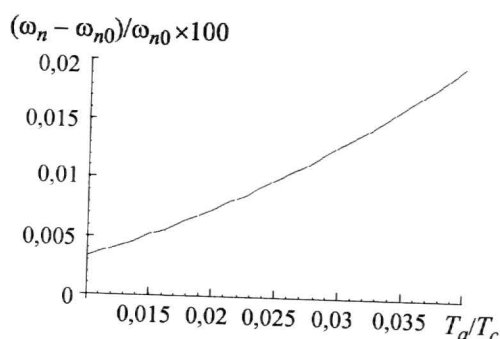


Рис.5. Относительный сдвиг собственной частоты в зависимости от отношения толщины кантилевера и нанесенного слоя при расположении слоя длиной 10% от его длины в центре кантилевера

Из формулы (3) можно получить выражения, описывающие сдвиг частоты в зависимости от расположения кластера относительно резонатора:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_{0n}} \cong \left( 1 + f\left(\frac{L-x_0}{x_0}\right) \frac{m_a}{m_c} \right)^{-1/2} \quad \text{для } x_0 \cong L,$$

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_{0n}} \cong \left( 1 + f\left(\frac{x_0}{L}\right) \frac{D-D_0}{D} \frac{\Delta x}{L} \right)^{1/2} \quad \text{для } x_0 \cong 0.$$

Вспомогательная для расчетов функция  $f(z)$ , рассчитанная в [7], равна:  $f(z) = 4,000 - 11,012 z$ .

Обобщая приведенные выше результаты, представим выражение для сдвига частоты с учетом всех рассмотренных эффектов:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_{n0}} \cong \alpha_1 \left( \frac{T_a}{T_c} \right) + \alpha_2 \left( \frac{T_a}{T_c} \right)^2 + \frac{3}{2} \frac{b_l + b_u}{E_c T_c} + \left( 1 + f\left(\frac{L-x_0}{x_0}\right) \frac{\rho_a \Delta x}{\rho_c L} \left( \frac{T_a}{T_c} \right) \right)^{-1/2}. \quad (8)$$

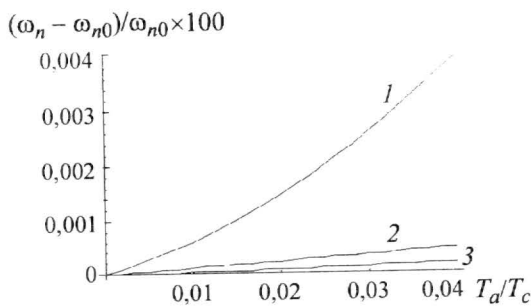


Рис.6. Зависимость отдельных вкладов в сдвиг резонансной частоты от толщины нанесенного слоя: 1 – влияние жесткости нанесенного слоя; 2 – влияние поверхностного напряжения; 3 – кластер, локализованный в центре резонатора

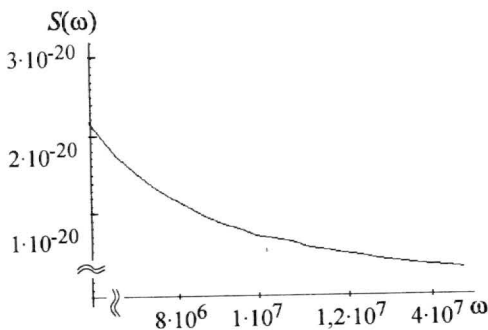


Рис.7. Спектральная плотность флуктуаций циклической частоты  $S(\omega)$ , обусловленная зависимостью скорости звука  $c_s$  и длины резонатора  $L$  от температуры

На рис.6 показана зависимость каждого члена выражения (8) от относительной толщины нанесенной пленки и кластера, расположенного в центре кантилевера. Естественно возникает вопрос о границах возможного экспериментального наблюдения сдвига частот, получаемых из выражения (8). Физическая причина этого – шумы, ограничивающие чувствительность экспериментальной схемы регистрации частоты [11]. В качестве примера рассмотрим влияние тепловых флуктуаций на скорость распространения звука  $c_s$  и шум в зависимости от линейных размеров кантилевера. Для спектральной плотности флуктуаций циклической частоты  $S(\omega)$  имеем [11]:

$$S(\omega) = \left( -\frac{c_s^2 k_n^2}{\omega_n^2} \alpha_T + \frac{2}{c_s} \frac{\partial c_s}{\partial T} \right)^2 \frac{k_B T^2 / \pi g}{1 + \omega^2 \tau_T^2},$$

где  $\alpha_T$  – линейный коэффициент теплового расширения;  $\tau_T$  – характерное время теплопроводности;  $T$  – температура балки;  $g$  – температуропроводность;  $k_B$  – постоянная Больцмана;  $k_n$  – собственные векторы колебаний балки.

График зависимости спектральной плотности от частоты для балки из кремния при колебаниях на частотах, близких к основной моде, и при температуре 300 К представлен на рис.7.

Для  $\omega = 9 \cdot 10^6$  рад/с имеем  $\Delta\omega/\omega \approx 10^{-17}$  рад/с, в то время как в рассматриваемом интервале  $T_d/T_c > 10^{-2}$ ,  $\Delta\omega/\omega > 10^{-6}$ , что заведомо превышает ограничения чувствительности по шуму. Однако следует учесть, что относительная погрешность современных методов измерения частоты составляет  $10^{-14}$ .

Таким образом, результаты данной работы позволяют рассматривать микрорезонаторы как перспективные сенсоры для исследования свойств нанесенных поверхностей.

### Литература

1. *Parsons G.N., Porod W., Tour J.M., Jame D.K.* Handbook of Nanoscience engineering and Technology / Ed. by W.A. Goddard. – CRC, 2003.
2. *Lavrik N.V., Sepaniak M.J., Datskos P.G.* Cantilever transducers as a Platform for Chemical and Biological Sensing // Rev. Sci. Instrum. – 2004. – Vol. 75. – P. 2229–2253.
3. Weighing of biomolecules, single cells and single nanoparticles in fluid / *T.P. Burg, M.Godin, S.M. Knudsen et al.* // Nature. – April 26. – 2007. – Vol. 446, Issue 7139. – P. 1066–1069.
4. *Терпи Д.В., Сударев А.В.* Влияние параметров системы и адсорбированных молекул на колебания в наноэлектромеханической системе // Материалы XXXVII междунар. науч. студенческой конф. «Студент и научно-технический прогресс». – Новосибирск: Новосибирский гос. ун-т., 1999. – С. 56.
5. *Lu P., Lee H.P., Lu C., O'Shea S.J.* Surface stress effects on the resonance properties of cantilever sensors // Phys. Rev. B 72. – 2005. – P. 085405–1085405-5.
6. *Tamayo J., Ramos D., Mertens J., Calleja M.* Effect of the adsorbate stiffness on the resonance response of microcantilever sensors // Appl. Phys. Lett. – 2006. – Vol. 89. – P. 224104-1. – 224104-3.
7. *Segall Sohrab Ismail-Beigi T. D.E., Arias A.* Elasticity of nanometer-sized objects // Phys. Rev. B 65. – 2002. – P. 214109–1214109-10.
8. Origin of the response of nanomechanical resonators to bacteria adsorption / *D.Ramos, J.Tamayo, J.Mertens et al.* // J. Appl. Phys. – 2006. – Vol. 100. – P. 106105–1106105-3.
9. *Sandberg R., Svendsen W., Molhave K., Boisen A.* Temperature and pressure dependence of resonance in multi-layer microcantilevers // J. Micromech. Microeng. – 2005. – Vol. 15. – P. 1454–1458.
10. Thermal effects on coated resonant microcantilevers / *F. Shen, P. Lu, K. H. Lee et. al.* // Sens. Actuators. – 2001. – Vol. A 95. – P. 17–23.
11. *Cleland A.N., Roukes M.L.* Noise processes in nanomechanical resonators // J. Appl. Phys. – 2002. – 92. – 2758–2769.

Статья поступила  
после доработки  
3 марта 2008 г.

**Вернер Виталий Дмитриевич** – доктор физико-математических наук, профессор, председатель научно-технического совета НПК «Технологический центр» МИЭТ. Область научных интересов: разработка и создание микро- и наноэлектромеханических систем.

**Гайдуков Геннадий Николаевич** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики МИЭТ. Область научных интересов: физические основы разработки микро- и наноэлектромеханических систем.

**Пагин Павел Сергеевич** – аспирант кафедры общей физики МИЭТ. Область научных интересов: исследование физических эффектов на поверхности микро- и наноэлектромеханических систем.

## Применение программируемой матричной логики для корреляционной обработки шумоподобных гидроакустических сигналов

*И.Н.Бурдинский*

**Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)**

С использованием технологии ПЛИС структуры FPGA разработан информационно-измерительный комплекс, позволяющий в реальном масштабе времени с высокой точностью обрабатывать гидроакустические навигационные и управляющие сигналы. Представлены результаты натурных испытаний макета разработанного комплекса.

Экспедиция на Северный полюс «Арктика-2007» еще раз показала, что одной из самых серьезных проблем, которая требует разрешения в процессе создания и эксплуатации автономных подводных аппаратов (АПА), является их навигационное обеспечение. Наиболее точное определение местоположения АПА может быть достигнуто за счет применения гидроакустических (ГА) навигационных систем, использующих синхронизированные излучатели, сигналы от которых принимаются и обрабатываются на борту обеспечивающего судна и непосредственно на АПА. Проблема обнаружения навигационного сигнала заключается в сложности достоверного приема полезной информации в водной среде за счет переменных физических характеристик среды и фоновых помех, уровень которых может превосходить уровень полезного сигнала. В связи с этим основными направлениями для создания высокоточных многоканальных систем приема и обнаружения информационно-управляющих гидроакустических сигналов становятся разработка алгоритмов обработки и выбор элементной базы для реализации этих алгоритмов.

Навигационные системы с шумоподобными сигналами (ШПС) получают все более широкое распространение [1]. Преимущества ШПС:

- обладают высокой помехозащищенностью при действии мощных помех;
- обеспечивают кодовую адресацию большого числа абонентов и их разделение при работе в общей полосе частот;
- дают возможность совместить прием информации с высокой достоверностью и измерение параметров движения объекта с высокой точностью.

Основным методом при обработке ШПС (коды Баркера, М-последовательности) с целью их обнаружения в зашумленном ГА-канале связи является корреляция, реализуемая схемой, известной как коррелятор [2–4]. Проведенные исследования на реальных ГА-сигналах [3, 4] показали, что реализация коррелятора во временной области обеспечивает более высокую точность определения момента прихода сигнала, чем реализация свертки в частотной области. Корреляционная функция для ШПС вычисляется как свертка принимаемого сигнала с маской:

$$R_k = \sum_{i=0}^{N-1} u_{k+i} m_i,$$

где  $u_k$  – последовательность входных отчетов;  $m_i$  – массив отчетов, сформированный для идеального сигнала (математическая маска) или для реального, полученный при приеме ШПС в лабораторных условиях (реальная маска);  $N$  – размер обрабатываемого окна.

Решение об обнаружении сигнала и определении времени распространения навигационного сигнала между пунктами излучения и приема принимается по максимальному значению корреляционной функции на рассматриваемом интервале и задержки этого максимума относительно импульса синхронизации. Размер обрабатываемого окна  $N$  для навигационного сигнала, равного по длительности  $\tau$  (в секундах) при частоте дискретизации  $f_d$  (в герцах) составит  $N = \tau f_d$  отчетов. Общее число отчетов  $P$ , которое необходимо обработать при поиске максимума корреляционной функции на каждом интервале излучения навигационного сигнала  $T$ , будет равно  $P = T f_d - N$ .

Для минимизации ошибки определения момента прихода сигнала [4] необходимо за один период частоты дискретизации  $f_d$  обработать массив данных, равный по длительности навигационному сигналу. Из этого следует, что операцию свертки необходимо провести за время  $T_0$ , которое должно удовлетворять условию  $T_0 < T_d = 1/f_d$ . Обозначим через  $f \otimes$  частоту, с которой выполняется операция свертки для массива длиной  $N$ . Тогда  $T_0 = N/f \otimes$  и получаем, что  $f \otimes > N f_d$ . При длительности навигационного сигнала  $\tau = 200$  мс и  $f_d = 48$  кГц выполнение операции свертки должно проводиться на частоте  $f \otimes > 460,8$  МГц.

В настоящее время в качестве средства реализации алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС) широко применяются цифровые сигнальные процессоры (ЦСП). Основное достоинство использования ЦСП при разработке систем ЦОС – большое разнообразие устройств с высоким быстродействием при реализации операций над данными с фиксированной и плавающей точкой, наличие развитой периферии, относительно невысокая стоимость. Вместе с тем ЦСП имеют и ряд недостатков. Во-первых, при реализации сложных параллельных структур приходится увеличивать число процессоров и обеспечивать их работу в мультипроцессорном режиме. Во-вторых, ЦСП требуют внешних элементов памяти программ, ОЗУ и т.п.

При симуляции предложенного метода корреляционной обработки ШПС для одного канала на ЦСП фирмы Texas Instruments TMS320C6455 с тактовой частотой 1,2 ГГц и 8-уровневой системой конвейеризации удалось достичь  $f \otimes = 300$  МГц. Альтернативой ЦСП при разработке систем ЦОС являются программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). Для реализации сложных алгоритмов ЦОС наиболее эффективным будет использование ПЛИС, построенных по технологии FPGA. Используя параллельную архитектуру и свойство реконфигурируемости, ПЛИС структуры FPGA обеспечивают высокую вычислительную производительность и позволяют разработчику создавать настраиваемую архитектуру для оптимальной реализации алгоритмов ЦОС при малых затратах времени на разработку. Во многих случаях ПЛИС структуры FPGA позволяют объединять функции пред- и постобработки информации, совместно с высокопроизводительной обработкой входных сигналов. Можно выделить три основных преимущества использования ПЛИС структуры FPGA для цифровой обработки сигналов: 1) FPGA матрицы позволяют реализовать функции ЦОС, используя регулярные (аналог ЦСП) и параллельные методы обработки; 2) FPGA матрицы являются полностью конфигурируемым аппаратным обеспечением, что дает возможность оптимально использовать требуемые алгоритмом ресурсы; 3) позволяют интегрировать всю систему ЦОС на одном кристалле.



В данной работе для разработки многоканальной системы обработки ГА сигналов использовались ПЛИС структуры FPGA Virtex-4 фирмы Xilinx, которые имеют в своем составе следующие специализированные блоки:

- XtremeDSP блоки, представляющие собой конвейерную структуру умножения/накопления с возможностью как подключения/отключения различных частей внутри блока, так и подключение XtremeDSP между собой для расширения. XtremeDSP обладает такими важными параметрами, как разрядность входных данных до 18 бит, разрядность выходных данных до 48 бит, скорость выполнения операций до 550 МГц;

- блоки быстрой памяти размером по 18 Кбит, позволяющие реализовывать на своей основе быстродействующие ПЗУ, ОЗУ, сдвиговые регистры, работающие на системной частоте.

Ускорение обработки данных, поступающих в реальном времени на систему цифровой обработки, достигнуто за счет реализации 4-ступенчатой конвейерной структуры с применением специализированных блоков матрицы FPGA Virtex-4. Однако уже при длительности навигационного сигнала  $\tau = 200$  мс,  $f_d = 48$  кГц и ограничении тактовой системной частоты  $f_F$  работы блоков матрицы FPGA до 100 МГц (энергетические показатели) время обработки окна превышает длительность периода  $f_d^{-1}$ :

$$T_0 = \frac{\tau f_d}{4 f_F} = 24 \cdot 10^{-6} > \frac{1}{f_d} = 20,8 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

Поэтому реализована еще и вертикальная  $n$ -уровневая ( $n \geq 2$ ) параллельная структура построения канала обработки навигационного сигнала, позволяющая за время  $T_0$  выполнить  $n$  операций свертки и которую можно описать следующим выражением:

$$\begin{aligned} R_k &= \sum_{i=0}^{N-1} u_{k+i} m_i, \\ R_{k+1} &= \sum_{i=0}^{N-1} u_{k+1+i} m_i, \\ &\dots\dots\dots \\ R_{k+n-1} &= \sum_{i=0}^{N-1} u_{k+i+n-1} m_i. \end{aligned}$$

Структурная схема коррелятора для одного канала цифровой системы обработки навигационных ШПС на базе матрицы FPGA Virtex-4 представлена на рис.1.

Размер двухпортовой памяти  $D$  для хранения отсчетов входного сигнала при условии, что разрядность АЦП равна 16 бит (2 байта), составит  $2(N + n - 1)$  байт. Размер памяти  $M$ , необходимый для хранения отсчетов маски, характеризующих рабочее окно (при условии, что разрядность одного отсчета равна 2 байта), можно посчитать как:

$$M = 2 S_T N_s \frac{f_d}{f_s} = 2N,$$

где  $S_T$  – количество периодов несущей частоты ШПС  $f_s$  на один символ;  $N_s$  – количество символов, составляющих код шумоподобного сигнала.

По импульсу синхронизации с частотой  $f_d$  происходит заполнение стековой памяти  $D$  отсчетами входного сигнала. Первые  $n - 1$  входные отчеты через  $(N + n - 1)$  тактов

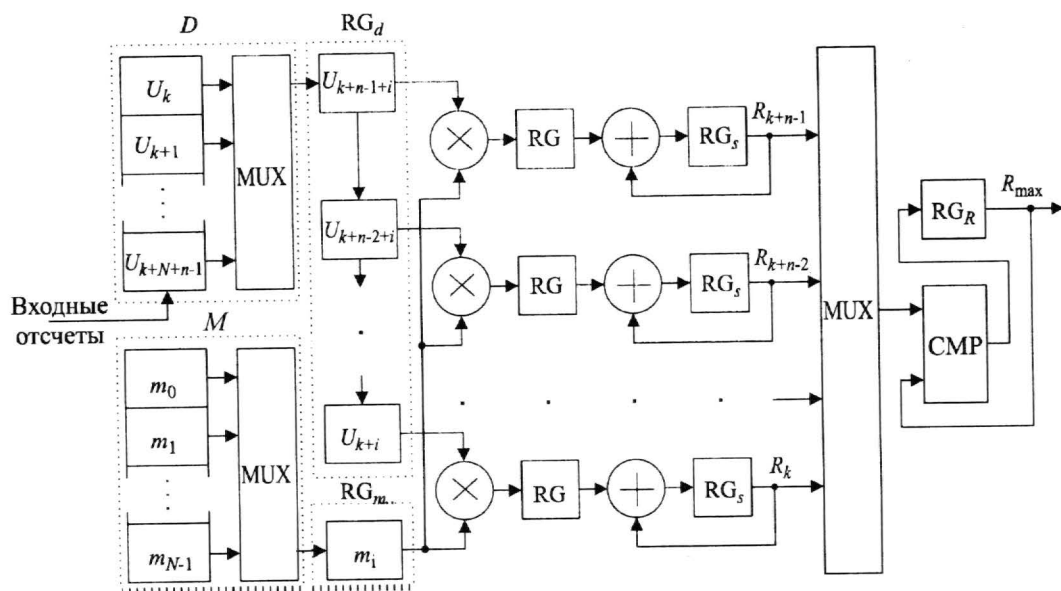


Рис. 1. Структурная схема коррелятора

частоты дискретизации переписываются в регистр сдвига  $RG_d$ , а значение  $m_0$  – в регистр  $RG_m$ . Далее на каждом такте системной частоты работы блоков матрицы FPGA выполняется операция свертки параллельно на всех  $n$  уровнях вертикально конвейера, сохранение результата свертки в регистрах  $RG_s$ , замещение данных в регистрах  $RG_d$  и  $RG_m$ . Через  $N$  тактов  $f_F$  вычисленные значения корреляционной функции с выходов регистров  $RG_s$  через мультиплексор поступают на вход компаратора CMP, где сравниваются по абсолютному значению с данными, записанными в регистре  $RG_R$ . В дополнительном регистре фиксируется номер отчета, на котором произошло вычисление большего значения корреляционной функции, записанного в  $RG_R$ , регистры  $RG_s$  очищаются, и начинается новый цикл обработки следующего окна.

Разработка исследовательского комплекса для проверки работоспособности предложенных алгоритмов и методов обработки гидроакустических сигналов проводилась в среде проектирования Xilinx ISE v8.2. Реализация комплекса, который представляет собой многоканальную систему цифровой обработки информационно-управляющих гидроакустических сигналов, выполнялась на базе отладочного стенда ML401 фирмы Xilinx [5]. При реализации устройства обнаружителя для одной несущей частоты ( $N_s = 127$ ;  $S_T = 8$ ;  $f_s = 12$  кГц;  $f_d = 48$  кГц) на матрице Virtex-4 XC4VLX25 затраты ресурсов кристалла составляют менее 10%. Как следствие, в системе обработки ГА-сигналов реализовано 10 каналов, каждый из которых может работать со своей несущей частотой или  $M$ -последовательностью, что позволит одновременно адресовать несколько объектов навигации и управления.

Натурные испытания макетного образца цифровой системы обработки ГА-сигналов проводились в октябре 2007 г. в бухте Рында залива Петра Великого (г. Владивосток) с борта научно-исследовательского судна «Юрий Молоков». Для выполнения испытаний был смонтирован пункт приема ГА сигналов, содержащий:

- систему сбора информации на базе персонального компьютера с поддержкой интерфейсов USB 2.0 Full Speed и RS-232C;
- систему цифровой обработки сигналов на базе отладочного стенда ML401 фирмы Xilinx;

- приемную антенну гидроакустических сигналов ПИ1-ЛУ3.814.

Сбор данных выполнялся под управлением разработанного программного обеспечения, которое включало: USB\_AUDIO – приложение для приема всего потока ГА-данных с приемной антенны и записи в файл формата wav; ComPort – приложение для приема результатов обработки ГА-данных в реальном масштабе времени от цифровой системы по интерфейсу RS-232C и записи в файл формата txt. Пункт приема был установлен на пирсе, антенна вывешена с пирса в воду на глубину 2,5–3,0 м, координаты приемной антенны определены с помощью GPS-приемника. Пункт излучения ГА-сигналов размещался на борту судна, которое перемещалось по акватории бухты с измерением текущих координат с помощью GPS-приемника. Состав пункта излучения:

- излучатель сигналов, представляющий собой выносную ГА-антенну ПИ1-ЛУ3.814 с усилителем мощности;

- цифровой блок формирования сложного информационно-управляющего сигнала ( $M$ -последовательности, коды Баркера), разработанный на базе отладочного стенда ML401 фирмы Xilinx для генерации ансамбля сигналов с интервалом (периодом) излучения 1, 5, 10 или 20 с и сигнала синхронизации, который может использоваться для начальной синхронизации приемника. Обобщенная схема используемого оборудования для проведения испытаний представлена на рис.2.

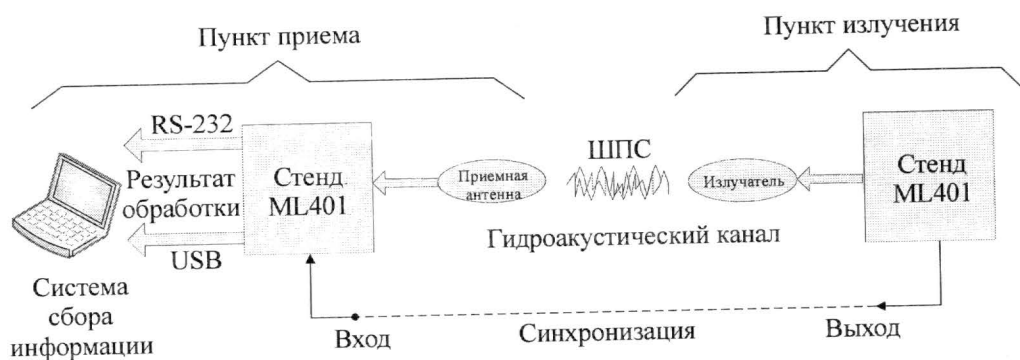


Рис.2. Обобщенная схема проведения испытаний

Перед началом испытаний была осуществлена синхронизация приемника на пирсе и излучателя на судне. После перехода судна от пирса и вывешивания излучающей антенны на глубину 2,5–3,0 м с периодом 10 с производилось излучение ансамбля сигналов  $m1$  и  $m2$ , представляющих собой две фазоманипулированные  $M$ -последовательности ( $N_s = 127$ ;  $S_T = 8$ ;  $f_s = 12$  кГц), сдвинутых на 0,5 с.

Принятые в пункте приема сигналы обрабатывались 4-канальным корреляционным приемником. В первом канале производилась свертка принятых данных с математической (идеальной) маской  $m1$ , созданной с помощью разработанного специального приложения. Во втором канале производилась свертка принятых данных с реальной маской  $r1$ , записанной в лабораторных условиях  $M$ -последовательности при удалении излучателя от приемной антенны на расстояние 1 м. В третьем канале происходила по-символьная свертка принятых гидроакустических данных с маской  $m1$ , представленной в двоичном коде. Свертка принятых данных с математической (идеальной) маской  $m2$  выполнялась в четвертом канале.

Выборочные результаты измерений и расчетов представлены в таблице, где GPS – дистанция между пунктами приема и излучения, полученная по GPS-приемнику; SNR – оценка отношения сигнал/шум для выбранной дистанции;  $K1$ ,  $K2$ ,  $K3$  – дистанции, по-

лученные для 1, 2 и 3 каналов соответственно;  $\delta l_{\max}$  – максимальная относительная ошибка измерения дистанции;  $K4-K1$  – временные задержки сдвинутого на 0,5 с сигнала  $m2$  относительно сигнала  $m1$ .

Результаты испытаний

GPS, м	SNR, дБ	K1, м	K2, м	K3, м	$\delta l_{\max}$ , %	K4-K1, с
145,10	-3,5	145,06	145,50	146,06	0,66	0,499875
501,92	-5,0	498,81	498,93	499,74	0,82	0,500125
1112,24	-17,5	1101,50	1095,28	1123,65	1,53	0,500000
1504,26	-18,0	1512,70	1513,80	1529,45	1,67	0,500250
1496,87*	-11,2*	1496,80*	1496,87*	1497,70*	0,55*	0,500000*

\*Мощность излучения была увеличена на 12 дБ.

Анализ полученных данных показал, что для данного типа антенн и используемых сигналов разработанные методы и средства позволяют определять момент времени прихода сигнала с ошибкой, не превышающей один период частоты дискретизации, при следующих условиях:  $f_d/f_s \geq 4$ ; уровень сигнала на входе АЦП более -40 дБ; SNR > -18 дБ.

Полученные результаты позволяют судить о перспективности использования технологии FPGA в гидроакустических навигационных и управляющих системах подводных аппаратов. Разработанные алгоритмы, методы и средства предполагается использовать в автономных необитаемых подводных аппаратах, создаваемых Институтом проблем морских технологий ДВО РАН [6].

### Литература

1. **Бурдинский И.Н., Миронов А.С.** Анализ эффективности использования корреляционной обработки шумоподобных гидроакустических навигационных сигналов // Материалы науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения Мирового океана» – Владивосток: Дальнаука, 2007. – С. 405–410.
2. **Варакин Л.Е.** Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
3. **Бурдинский И.Н., Карабанов И. В., Линник М.А., Миронов А.С.** Модель цифровой системы обработки широкополосных навигационных сигналов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008610396. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2008.
4. **Burdinskiy I.N., Mironov A.S., Naumov L.A.** System Simulation for Digital APS Signal Processing On the Basis of Programmable Array Logic // Signal Transmission, Processing, Sensor and Monitoring Systems: Proceeding of the Korea-Russia Joint-Workshop 2006. – Korea: Obprint Ltd., 2006. – P. 115–120.
5. Virtex-4 ML401 Evaluation Platform [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.xilinx.com/products/devkits/HW-V4-ML401-UNI-G.htm>
6. Дальневосточное отделение Российской академии наук, Приморский научный центр, Институт проблем морских технологий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://imtp.febras.ru/contact.html>

Статья поступила  
23 января 2008 г.

**Бурдинский Игорь Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники Тихоокеанского государственного университета (г. Хабаровск). *Область научных интересов:* применение вычислительной и микропроцессорной техники в системах измерения и обработки данных.

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 541.13:621.315.592

### Влияние режима формирования анодных оксидных пленок кремния в гальваностатическом режиме на содержание в них фосфора

Л.П.Милешко

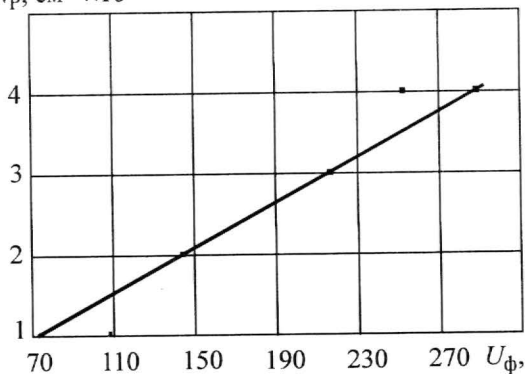
Технологический институт Южного Федерального университета в г. Таганроге

Легированные фосфором анодные оксидные пленки (АОП) являются перспективным материалом для создания различных элементов кремниевых приборов и интегральных микросхем [1, 2]. В работе [3] изучалось накопление фосфора в АОП в зависимости от концентрации ортофосфорной кислоты в электролитах на основе органических растворителей. Однако роль формирующего напряжения при этом не учитывалась.

Целью настоящей работы является исследование зависимости количества внедренного в АОП фосфора от значения напряжения формирования.

Получение фосфорсодержащих АОП на кремнии марки КДБ-1 и определение концентрации фосфора в них методом нейтронно-активационного анализа проводилось по методикам, описанным в [3]. Исследования проводились на пластинах Si размером  $10 \times 10$  мм с кристаллографической ориентацией (111), толщиной 400 мкм. Анодирование кремния осуществлялось на установке с вакуумной присоской, в которой использовано подъемное устройство от микроскопа МБС-1, а электролизная ванна выполнена из особо чистого кварцевого стекла. Объем электролита составлял 150 мл; расстояние анод – платиновый катод ( $5,0 \times 5,0$  см) – 2 см. Погрешность определения концентрации фосфора не превышала 15 – 25%. Параметр анодирования  $m = 0,5$  нм/В (прирост толщины АОП на 1 В формирующего напряжения). В первоначальный период формирования АОП до напряжения около 70 В наблюдается нелинейный рост  $\text{SiO}_2$ . После кратковременного быстрого роста АОП до толщины 20 нм наступает индукционный период. Затем происходит доращивание пленки до 35 нм и начинается линейная зависимость толщины АОП от формирующего напряжения.

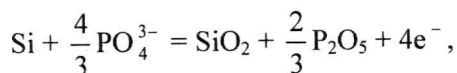
$N_P, \text{см}^{-3} \times 10^{20}$



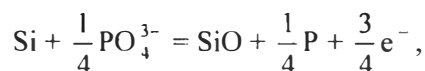
Зависимость концентрации фосфора  $N_P$  в АОП от напряжения формирования  $U_{\text{ф}}$  при плотности тока анодирования  $5 \text{ мА/см}^2$  кремния КДБ-1 в  $\text{ЭГ} + 1,5 \text{ М Н}_3\text{РО}_4 + 1 \text{ М Н}_2\text{О}$

Как следует из рисунка, с увеличением напряжения формирования  $U_{\text{ф}}$  от 74 до 288 В концентрация фосфора  $N_P$  в АОП линейно возрастает от  $1 \cdot 10^{20}$  до  $4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . При этом зависимость  $N_P$  от  $U_{\text{ф}}$  аппроксимируется выражением:  $N_P = 1,4 \cdot 10^{18} U_{\text{ф}} - 2,5 \cdot 10^{18}$  с коэффициентом корреляции, равным 0,982. Это, вероятно, обусловлено синбатным повышением содержания анионов  $\text{PO}_4^{3-}$  в гель-слое [4, 5] АОП, из которого происходит инжекция фосфат-анионов в их объем, по мере повышения величины формирующего напряжения.

На границе АОП–электролит протекают следующие реакции [3]:







в результате которых фосфор может входить в анодный  $\text{SiO}_2$  в виде фосфорного ангидрида или в элементарном состоянии.

Таким образом, несмотря на неравномерное распределение фосфора по толщине АОП [6], количество его в веществе АОП характеризуется линейной зависимостью от потенциала анода.

### Литература

1. Милешко Л.П., Авдеев С.П. Формирование эмиттерных и базовых областей  $n$ - $p$ - $n$ -транзисторов диффузией фосфора и бора из анодных оксидных пленок кремния // Электронная промышленность. – 2002. – № 1. – С. 67–68.
2. Милешко Л.П. Применение легированных анодных оксидных пленок в технологии кремниевых приборов и интегральных микросхем // Электронная промышленность. – 2004. – № 4. – С. 160, 161.
3. Милешко Л.П. Анодное окисление кремния в легирующих электролитах // ФХОМ. – 2004. – № 3. – С. 81–92.
4. Ljklema J. The Electrical Double Layer on Oxides // Croatica Chemica Acta. – 1971. – Vol. 43. – № 4. – P. 249–260.
5. Милешко Л.П., Гапоненко Н.В. Коллоидно-химические закономерности формирования и строения легированных оксидных пленок на поверхности полупроводников // Тез. докл. Второй всесоюзной конф. по физик стеклообразных твердых тел. – Рига – Лиелупе: Институт физики Латвийской Ан, 1991. – С. 220.
6. Милешко Л.П., Авдеев С.П., Нестюрина Е.Е. Состав, строение и свойства легированных анодных окисных пленок кремния // ФХОМ. – 2003. – № 3. – С. 47–52.

Поступило 26 декабря 2007 г.

**Милешко Леонид Петрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры химии и экологии Технологического института Южного федерального университета в г. Таганроге. Область научных интересов: физико-химические основы и экологическая безопасность микро- и нанотехнологий с применением электрохимических методов.

УДК 621.382.323.001.57

## Четырехпараметрическая $C_\infty$ -непрерывная компактная модель полевого транзистора

*В.Н.Бирюков*

Технологический институт Южного федерального университета в г. Таганроге

Региональные (кусочные) модели полевого транзистора (ПТ) в силу разрыва высших производных на границе пологой и крутой областей ВАХ не позволяют оценивать интермодуляционные искажения. Для их расчета разработан ряд моделей, непрерывных вместе со всеми своими производными [ 1 ]. Общим недостатком этих моделей является высокое число параметров (не менее 15), что приводит к проблемам их экспериментального определения.

В настоящей работе рассматривается статическая математическая модель ПТ в замкнутой форме (компактная модель), непрерывная со всеми производными – аналитическая функция, или  $C_\infty$ -непрерывная [2]. Особое внимание уделено вопросам идентификации ее параметров, поскольку фактическая точность моделирования во многом определяется эффективностью процедуры экстракции параметров.

Простейшая региональная статическая модель ПТ имеет вид

$$I_D = \begin{cases} 0 & \text{при } V_G \leq 0, \\ \beta(2V_G - V_{DS})V_{DS}(1 + \lambda V_{DS}) & \text{при } V_{DS} < V_G, \\ \beta V_G^2(1 + \lambda V_{DS}) & \text{при } V_{DS} \geq V_G, \end{cases} \quad (1)$$

где  $I_D$  – ток стока;  $V_G = V_{GS} - V_{T0}$  – эффективное напряжение затвора;  $V_{GS}$  и  $V_{DS}$  – напряжения на затворе и стоке относительно истока соответственно;  $\beta$  – удельная крутизна;  $V_{T0}$  – пороговое напряжение;  $\lambda$  – параметр, характеризующий модуляцию длины канала напряжением стока [ 3 ].

© В.Н.Бирюков, 2008

Наиболее эффективно параметры моделей определяются по измеренным ВАХ ПТ методом наименьших квадратов. Поиск минимума функционала

$$S(\beta, T_{T0}, \lambda, V_{GS}, V_{DS}) = \sum_{j=1}^n [I_D(V_{GSj}, V_{DSj}, \beta, V_{T0}, \lambda) / I_{Dj} - 1]^2 = \sum_{j=1}^n \delta_j^2$$

(здесь  $\{I_{Dj}, V_{GSj}, V_{DSj}\}$  – табличная ВАХ) облегчается тем, что параметры  $\beta$  и  $\lambda$  могут быть найдены аналитически из системы уравнений  $\partial S / \partial \beta = 0$ ,  $\partial S / \partial \lambda = 0$ . Численный спуск становится одномерным, что решает все проблемы, связанные с выбором начальных значений, выпуклостью функционала, жесткостью и обусловленностью задачи оптимизации.

Модель (1) получена в предположении, что плотность заряда подвижных носителей в канале изменяется пропорционально напряжению на затворе. Если аппроксимировать плотность заряда подвижных носителей в канале ПТ функцией, линейной при напряжениях на затворе больше порогового и близкой к нулю в остальных случаях, то простейшая непрерывная (континуальная) модель приобретает вид [4]

$$I_D = (\beta/2)[V_G V_N - (V_G - V_{DS}) V_D + V_\epsilon^2 \ln(V_N/V_D)], \quad (2)$$

где  $V_N = \sqrt{V_\epsilon^2 + V_G^2} + V_G$ ;  $V_D = \sqrt{V_\epsilon^2 + (V_G - V_{DS})^2} + V_G - V_{DS}$ ;  $V_\epsilon$  – малая величина, измеряемая в вольтах. Если в (2) ввести множитель  $(1 + \lambda V_{DS})$ , то полученная таким образом модель в пределе при  $V_\epsilon \rightarrow 0$  совпадает с региональной моделью (1), а при конечной величине  $V_\epsilon$  поставленная задача формально может считаться решенной. Модель (1), как и полученная указанным образом континуальная, обладает наибольшей погрешностью среди трехпараметрических моделей [5].

Для повышения точности моделирования выражение (2) необходимо умножать не на линейную функцию  $(1 + \lambda V_{DS})$ , а на функцию, равную единице при  $V_{DS}$  менее напряжения насыщения  $V_E$  и растущую пропорционально  $V_{DS}$  (с коэффициентом пропорциональности  $\lambda$ ) при  $V_{DS} > V_E$ , поскольку модуляция длины канала напряжением стока наблюдается только на пологом участке ВАХ. В качестве такой функции удобно выбрать использованную ранее функцию плотности заряда в канале ПТ.

Величина  $V_E$  может быть определена аналитически [5], однако далее используется грубое приближение  $V_E = V_G - 2 V_\epsilon$ , что позволяет сохранить линейную зависимость  $S$  от параметра  $\lambda$  без заметного уменьшения точности модели, так как вблизи  $V_E$  ток ПТ изменяется несущественно. Возможность введения нового параметра в (2) без ухудшения качества процедуры экстракции параметров может быть использована и для повышения точности модели путем введения нового параметра  $\kappa$ , учитывающего снижение подвижности носителей в продольном электрическом поле канала. Для учета данного эффекта в существующих моделях выражение для тока канала на крутом участке ВАХ делится на  $(1 + \kappa V_{DS})$ . В предлагаемой модели это же выражение умножается на  $(1 - \kappa V_{DS})$ , что допустимо при малых значениях  $\kappa$ . Таким образом, дополнительный множитель к выражению (2) представляет собой функцию  $V_{DS}$ , равную единице при  $V_{DS} = 0$ , линейно падающую (пропорционально  $\kappa$ ) при малых напряжениях стока и линейно возрастающую (пропорционально  $\lambda$ ) при  $V_{DS} > V_E$ . Четырехпараметрическая континуальная модель ПТ при принятых допущениях принимает вид

$$I = \frac{\beta}{2} \left[ V_G V_N - (V_G - V_{DS}) V_D + V_\epsilon^2 \ln \frac{V_N}{V_D} \right] \left\{ \frac{\lambda}{2} \left[ \sqrt{V_\epsilon^2 + (V_{DS} - V_E)^2} + V_{DS} - \sqrt{V_\epsilon^2 + V_E^2} \right] + \right. \\ \left. + \frac{\kappa}{2} \left[ \sqrt{V_\epsilon^2 + (V_{DS} - V_E)^2} - V_{DS} - V_E - \sqrt{V_\epsilon^2 + V_E^2} \right] + 1 \right\}. \quad (3)$$

Выражение (3) не устраняет один из недостатков модели (1) – линейную аппроксимацию тока на пологом участке ВАХ, что увеличивает погрешность моделирования начального участка вблизи напряжения насыщения. Величина промежуточной области между крутым и пологими участками экспериментальных ВАХ соизмерима с протяженностью крутого участка и увеличи-

вается в первом приближении пропорционально эффективному напряжению затвора. Модель (3) позволяет получить такой промежуточный участок путем замены малого параметра  $V_e$  линейной функцией с эмпирическим коэффициентом  $V_e = 0,25 V_G$ . Грубость принятых допущений оправдывается ростом надежности процедуры экстракции параметров транзистора, поскольку минимизируемый численно функционал удается привести к виду  $S[\beta(V_{T0}), V_{T0}, \lambda(V_{T0}), \kappa(V_{T0}), V_{GS}, V_{DS}]$ , где  $\beta(V_{T0})$ ,  $\lambda(V_{T0})$  и  $\kappa(V_{T0})$  определяются аналитически из системы уравнений  $\partial S/\partial \beta = 0$ ,  $\partial S/\partial \lambda = 0$ ,  $\partial S/\partial \kappa = 0$ . Поскольку задача численной оптимизации оказывается одномерной, то фактическая точность модели (3) в данном случае совпадает с потенциальной [1].

Модель (3) разработана для полевого транзистора с управляющим  $p$ - $n$ -переходом. Ее можно использовать и для транзистора с изолированным затвором в режиме сильной инверсии. Для повышения точности моделирования в последнем случае применима известная континуальная модель, учитывающая снижение подвижности носителей заряда в канале в поперечном электрическом поле [6].

Для проверки адекватности модели (3) ее параметры определялись для транзисторов, использованных для эксперимента [5]. В таблице приведены параметры региональной модели, непрерывной вместе со своей первой производной (1), региональной модели из [5], непрерывной вместе с двумя первыми производными, и континуальной модели (3). Поскольку среднеквадратическая погрешность не дает полного представления о качестве аппроксимации, в таблице указаны максимумы абсолютной величины относительной погрешности.

Параметры и погрешности моделей ПТ

Транзистор	Модель	$\beta$ , $\text{mA} \cdot \text{B}^{-2}$	$\lambda$ , $\text{B}^{-1}$	$V_{T0}$ , В	$\kappa$ , $\text{B}^{-1}$	$\sigma$ , %	$\max \delta_{j1} $ , %
КП307А	$C_1$	2,6119	0,2582	-1,3658	—	0,6186	9,3
	$C_2$	2,7510	1,3338	-1,3568	—	0,3640	5,9
	$C_\infty$	2,7464	0,18867	-1,3487	0,06636	0,3370	6,1
2П312Б	$C_1$	0,6116	0,2228	-3,1202	—	1,163	15,9
	$C_2$	0,6773	1,2569	-3,0914	—	1,054	12,7
	$C_\infty$	0,6694	0,1929	-3,0741	0,00957	1,014	12,3

Предложенная модель предназначена для оценки интермодуляционных искажений в радиотехнических цепях на ПТ. Модель не содержит новых параметров по сравнению с известными, имеет более низкую погрешность, чем трехпараметрическая модель и позволяет эффективно проводить идентификацию параметров методом наименьших квадратов.

### Литература

1. **Foty D.P.** MOSFET modeling with SPICE: principles and practice. Prentice Hall PTR, NJ, 1997. — P. 653.
2. **McAndrew C.C., Bhattacharyya B.K., Wang O.A.**  $C_\infty$ -continuous depletion capacitance model // IEEE Trans. Comput.-Aided Design. — 1993. — Vol. CAD-12, June. — P. 825–828.
3. **Antognetti P., Massobrio G.** (Eds.) Semiconductor Device Modeling with SPICE. — New York: McGraw-Hill, 1987.
4. **Гергель В.А., Марасанов А.В., Орешкин Г.И.** Простая аналитическая модель короткоканального МОП-транзистора для численного моделирования схемотехнических задач // Микроэлектроника. — 1989. — Т. 18, вып. 2. — С. 162–165.
5. **Бирюков В.Н., Пилипенко А.М.** Исследование трехпараметрической модели высокочастотного полевого транзистора // Изв. вузов. Электроника. — 2003. — № 6. — С. 22–26.
6. **Бирюков В.Н.** Анализ высоковольтного и охлаждаемого МДП-транзистора. Сб. XII Всесоюзная научная конференция по микроэлектронике. Тез. докладов, Ч. 1, Тбилиси, 1987. — С. 139–140.

Поступило  
11 июля 2007 г.

**Бирюков Вадим Николаевич** — кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ радиотехники ТТИ ЮФУ. *Область научных интересов:* моделирование компонентов электронных цепей, идентификация параметров моделей, численные методы анализа жестких систем.

## Лепестковый датчик угловых координат солнечной энергетической установки

*Е.В.Батырев, Тхейн Лин У*

Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)

Проблема освоения солнечной энергии является актуальной и она в значительной степени решена. Однако в случае подвижных энергетических носителей и в условиях временного, случайного затенения возникают проблемы, связанные с экстраполяцией положения Солнца и ориентированием фотоэлементов относительно него [1].

Электрическая энергия солнечной батареи зависит от угла падения лучей Солнца и наибольшее значение она приобретает, когда лучи падают на поверхность фотоприемника вертикально. Направление на Солнце постоянно меняется и необходимо корректировать положение фотоприемника. Этим целям служит угломерная следящая система с электроприводом. Отклонение положения Солнца от вертикали (оптической оси) фотоприемника определяется с помощью двух лепестковых датчиков по углу места  $\Delta\epsilon$  (рис.1) и по азимуту [2].

В системах обычно используется равносигнальный метод пеленгования, в котором с помощью двух фотометрических датчиков  $A$  формируется равносигнальная зона (см. рис.1). Следящая солнечная система состоит из фотоэлектрических антенн, формирователя, электропривода, экстраполятора, устройства прерывания контура слежения. Антенны фиксируют рассогласование  $\phi$  между оптической осью и направлением на цель  $\Pi$  (Солнце) по углу места и азимуту соответственно. Следящий электропривод с обратной связью настраивает систему на точное слежение [3]. Экстраполяция сигнала дает возможность более точного слежения и особенно необходима в случае временного затенения Солнца, когда система переходит в режим разомкнутого управления. Применение экстраполяции при длительном затенении предъявляет особые требования к линейности пеленгационной характеристики. Нелинейность воспринимается экстраполяционной системой как источник искажения.

Рассмотрим схему суммарно-разностного формирователя ошибки в плоскости (см. рис.1,а). В результате суммирования и вычитания парциальных сигналов антенны  $u_{\Pi 1}(t)$  и  $u_{\Pi 2}(t)$  на выходе формирователя образуются суммарный  $u_{\Sigma}(t)$  и разностный  $u_{\Delta}(t)$  сигналы. Зависимость суммарного напряжения  $u_{\Sigma}(t)$  от углового отклонения источника сигнала определяется суммарной диаграммой направленности, которая выражается через парциальные диаграммы направленности соотношением  $G_1(\phi) = g_1(\phi) + g_2(\phi)$ , где  $\phi$  – отклонение парциальной диаграммы от равносигнальной зоны. Аналогично определяется разностное напряжение по соотношению  $G_2(\phi) = g_1(\phi) - g_2(\phi)$ .

Пеленгационная характеристика формируется как функция отношения разности сигналов от каждого лепестка антенны к их сумме по вертикальному и курсовому каналам соответственно. В системе слежения (см. рис.1,а) сигнал ошибки рассогласования (ошибки наведения) поступает в блок экстраполятора ошибки (ЭП). В случае затенения Солнца помехой (на рис.1,а – блок П) срабатывает устройство размыкания контура слежения (УРС) и управление происходит по разомкнутому режиму экстраполятора (Эк). С выхода экстраполятора управляющий сигнал подается на электропривод (ЭП), который поворачивает антенну.

Параболическая антенна состоит из четырех одинаковых лепестков – фотоэлементов. На рис.1,б показан профиль одного лепестка параболической антенны. Парабола имеет параметр  $p$  и радиус  $R$ . В зависимости от угла падения луча  $\alpha$  на поверхность фотоэлемента данной гипотетической антенны меняются наводимые токи.



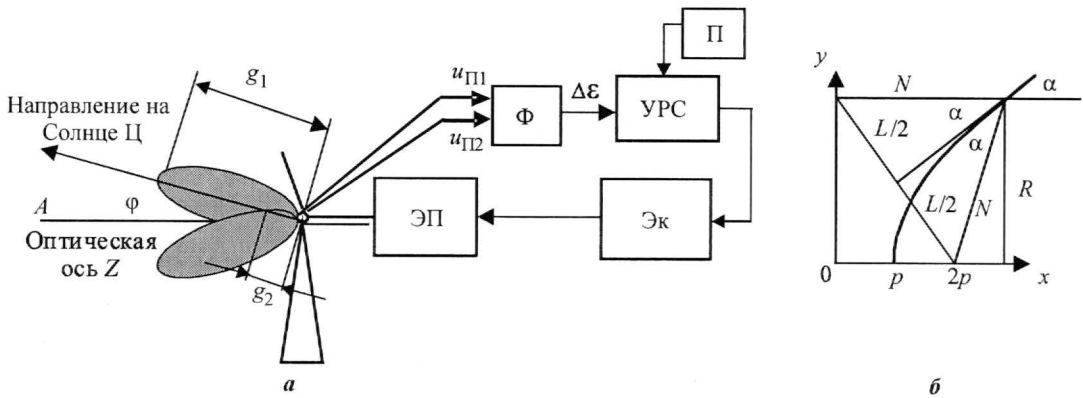


Рис.1. Угломерная система солнечной батареи с приводом (а);  
лепестковая параболическая антенна (б)

Эффективная площадь фотоэлемента определяется как интегральное произведение элементов площади поверхности фотоэлемента-антенны  $S$  на  $\sin \alpha$ , где  $\alpha$  – соответствующий элементу угол. Для оценочных расчетов поверхность антенны разбита на пять концентрических полос, разрезанных по секторам, каждая из которых имеет свой радиус  $R$ . Максимальное значение радиуса условно принято равным 10. Расчетные значения радиусов равны 1, 3, 5, 7, 9.

Угол падения луча  $\alpha$  на поверхность фотоэлемента – параболы – легко определить из рис.1,б:  $N = \frac{L}{2 \sin \alpha}$ , где  $L = \sqrt{R^2 + (2p)^2}$ . В результате преобразований получаем

$$\cos \alpha = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (2p)^2}}.$$

Суммируя произведения площади полос сектора на соответствующие значения функций углов  $\cos \alpha$ , получим эффективную площадь сектора антенны в зависимости от углов падения лучей  $\alpha$ . Разность сигналов фотоэлементов противоположных секторов антенны составляют пеленгационную характеристику.

Проведенные расчеты показали возможность получения симметричной относительно начала координат пеленгационной характеристики в виде линейной функции от угла пеленгования в пределах  $\pm 25^\circ$  с ошибкой порядка 3%.

### Литература

1. Кузин Л.Т. Расчет и проектирование дискретных систем управления. – М.: Машгиз, 1962. – 672 с.
2. Соколов О.Л., Голод О.С., Войцеховский А.Б. Радиоавтоматика: Письменные лекции. – СПб.: СЗТУ, 2003. – 72 с.
3. Васильев К.К. Теория автоматического управления (следающие системы): Учеб. пособие. – 2-е изд. – Ульяновск, 2001. – 98 с.

Поступило после доработки  
13 февраля 2008 г.

**Батырев Евгений Васильевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматического управления и контроля МИЭТ. *Область научных интересов:* идентификация динамических систем, автоматизация технологических процессов, автоматические системы управления и контроля.

**Тхейн Лин У** – аспирант кафедры систем автоматического управления и контроля МИЭТ. *Область научных интересов:* автоматизация технологических процессов, автоматические системы управления и контроля.

# Генератор гауссовских импульсов для сверхширокополосных приемопередатчиков

А.В.Гуреев, С.Е.Воронин

Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)

В настоящее время широко внедряются сверхширокополосные (СШП) системы передачи данных. К преимуществам СШП систем относятся высокая скорость передачи данных, низкий уровень излучаемой мощности. В то же время реализация приемопередающего тракта таких систем представляет сложную задачу. Известные аналоги формируют гауссовские импульсы длительностью более 230–250 пс [1], дальность передачи без выходных усилителей мощности составляет порядка 10 метров.

В настоящей работе показано формирование гауссовского импульса минимальной длительности для увеличения скорости передачи данных.

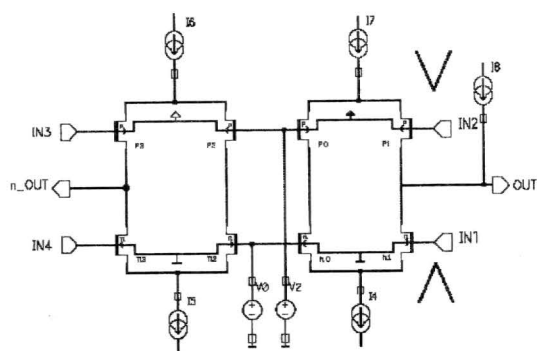


Рис. 1. Схема генератора гауссовских импульсов

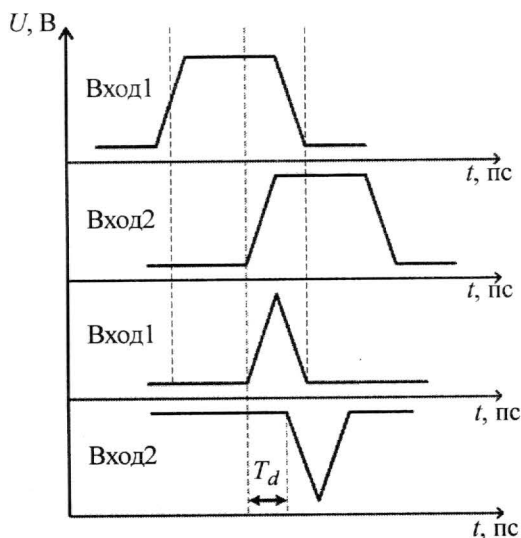


Рис. 2. Диаграмма образования треугольных импульсов

Для формирования гауссовских импульсов используются два метода: 1) с применением схемы на туннельном диоде, в результате чего получается импульс длительностью около 0,3 нс [2]; 2) с помощью схемы формирования импульса [1]. Минимальная длительность импульса во втором методе зависит от порядка схемы формирования. При использовании схемы первого порядка длительность импульса меньше 250 пс получить невозможно, а временная форма сигнала сильно искажена. Схемы второго порядка позволяют получать импульсы длительностью 230 пс, но при этом удваивается потребление энергии. Использование схем более высокого порядка не рационально, так как длительность импульса уменьшается очень медленно, а потребление питания растет пропорционально порядку.

На рис. 1 показана новая схема сглаживания треугольных импульсов. В ее состав входит генератор треугольных импульсов, на выходе которого вырабатываются пары импульсов с определенной задержкой, как показано на рис. 2. Минимальная длительность импульса достигается путем правильного подбора этой задержки. Потребляемый ток 1,5 мА.

В работе используется 0,13-мкм КМОП-технология. На основе моделей данной технологии в программных комплексах «Advanced Design System» и «Cadence» получена транзисторная модель передающей части приемника с максимальной частотой передачи импульсов 2,5 ГГц.

Спектр импульса находится в диапазоне от 1,5 до 7 ГГц, потребляемый ток составляет около 13 мА при напряжении 1,5 В.

В результате проектирования приемопередатчика получен гауссовский импульс длительностью менее 200 пс. Благодаря этому при применении фазовой модуляции скорость передачи данных возрастает приблизительно на 20%. На рис. 3 представлена форма полученного в результате проектирования импульса.

Согласно результатам проведенного моделирования, спектральная плотность мощности полученного сигнала не превышает  $6,5 \cdot 10^{-11}$  мВт/Гц и укладывается в установленную международным стандартом спектральную маску [3].

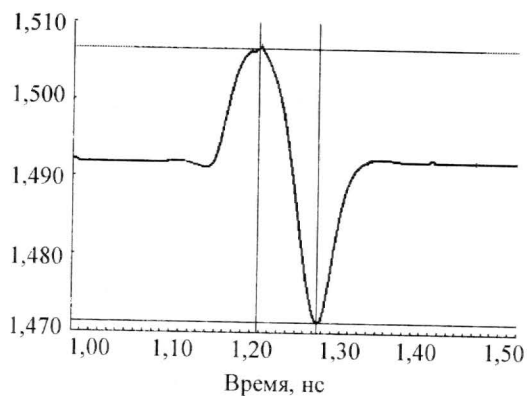


Рис.3. Гауссовский импульс

### Литература

1. A PPM Gaussian Monocycle Transmitter for Ultra-Wideband Communication [http://duteela.et.tudelft.nl/~wout/output/ISCAS2004\\_Bagga\\_DeVita\\_Haddad\\_Serdijn\\_Long.pdf](http://duteela.et.tudelft.nl/~wout/output/ISCAS2004_Bagga_DeVita_Haddad_Serdijn_Long.pdf)
2. UWB Pulse Based Test-Beds for communication and radar [www1.epfl.ch/~uwb4sn/slides/Buchegger\\_Reisenzahn\\_Lausanne.ppt](http://www1.epfl.ch/~uwb4sn/slides/Buchegger_Reisenzahn_Lausanne.ppt)
3. Имморев И., Судаков А. Сверхширокополосные и узкополосные системы связи. Совместная работа в общей полосе частот // Электроника НТБ. — 2003. — № 2. — С. 36–39.

Поступило  
1 февраля 2008 г.

**Гуреев Александр Васильевич** — доктор технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* математическое моделирование и анализ характеристик беспроводных сетей, исследование процессов распространения электромагнитных волн в беспроводных сетях вне и внутри зданий, электродинамика неоднородно заполненных волноводных и резонансных структур.

**Воронин Сергей Евгеньевич** — аспирант кафедры радиоэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* схемотехническое и топологическое проектирование интегральных аналоговых и цифровых схем, защита информационных технологий, оптимизация приемопередающих сверхширокополосных устройств.

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

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

**Подписной индекс  
47570**

## Компьютерное моделирование процедур идентификации динамических объектов

*В.М.Трояновский*

Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)

Идентификация (определение весовой функции динамических объектов) является актуальной задачей изучения свойств объекта. Очень важно, что результат можно получить по данным нормального функционирования, используя шумообразные отклонения сигналов от установленного рабочего режима. Для учета стохастического характера сигналов широко используются статистические методы. При ограниченных интервалах наблюдения и использовании единственной реализации (вместо гипотетического ансамбля независимых реализаций) статистические расчеты всегда дают лишь приближенные оценки искомых параметров и статистические свойства этих оценок зависят от условий накопления данных и алгоритма их последующей обработки.

Прямое использование уравнения типа Винера–Хопфа для решения задачи идентификации имеет значительные изъяны, для преодоления которых в разное время выдвигались гипотезы о плохой сходимости корреляционной функции к ковариационной, о плохой обусловленности решения обратной задачи при решении интегральных уравнений, а также применялись методы регуляризации. В [1] дано объяснение возникающих эффектов и решена задача идентификации, кроме того, предложен метод улучшения получаемых оценок, превосходящий по эффективности метод регуляризации.

С использованием метода наименьших квадратов получено следующее соотношение для вычисления ординат оценки весовой функции  $\hat{h}_1$ :

$$R_{xx}[l] - \sum_{q=0}^L \hat{h}_1[q] R_{xx}[l-q] = 0, \quad l = 0, 1, 2, \dots, L,$$

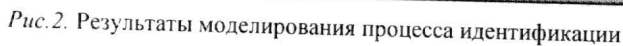
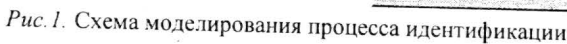
где матрица частной (имевшей место в данном эксперименте) автокорреляционной функции входного сигнала  $R_{xx}[l-q]$  и частный вектор взаимной корреляции  $R_{xz}[l]$  определяются как

$$R_{xx}[l-q] = \sum_{j \in J} x[j-l]x[j-q], \quad R_{xz}[l] = \sum_{j \in J} z[j]x[j-l].$$

При этом ковариационная матрица погрешности оценки для линейного приближения и  $\delta$ -коррелированной помехи (с дисперсией  $\sigma_n^2$ ) определяется как  $C_{\Delta h} \approx \frac{\sigma_n^2}{m} K_{xx}^{-1}$ , где  $K_{xx}$  – ковариационная матрица сигнала;  $m$  – объем выборки.

Для верификации полученных соотношений проведено компьютерное моделирование (рис.1) процесса идентификации с использованием реализаций ограниченной длины, коррелированных входных сигналов и сильно зашумленных выходных данных.

Методика моделирования сигналов соответствует [2]. В качестве платформы для моделирования использован пакет программ Excel + VBA. В его состав входят средства табличного и визуального представления данных, мощные вычислительные средства, включая матричные операции, средства графического представления результатов и механизм разработки новых функций на базе макросов. При моделировании в качестве объекта использовалось апериодическое звено 1-го порядка с постоянной времени  $T = 5$ , длина весовой функции принята  $L = 15$ , длина реализации 100 отсчетов, дисперсия помехи составляла 100% по отношению к дисперсии полезного выходного сигнала.



Результаты моделирования (рис.2) подтвердили справедливость полученных теоретических соотношений, что позволяет рекомендовать созданную методику и программное обеспечение для изучения свойств реальных объектов, в том числе в производственных процессах микроэлектроники.

## Литература

1. **Трояновский В.М.** Информационно-управляющие системы и прикладная теория случайных процессов: Учеб. пос. – М.: Гелиос АРВ, 2004. – 304 с.
2. **Трояновский В.М.** Об адекватном математическом аппарате при моделировании действующих объектов // Изв. вузов. Электроника. – 1997. – № 6. – С. 83–93.

Поступило 28 февраля 2008 г.

**Трояновский Владимир Михайлович** – кандидат технических наук, профессор кафедры информатики и программного обеспечения вычислительных систем МИЭТ. *Область научных интересов:* методика применения компьютеров в информационных и обучающих системах; моделирование динамических объектов в условиях случайных воздействий и помех; идентификация; разработка программного обеспечения автоматизированных систем.

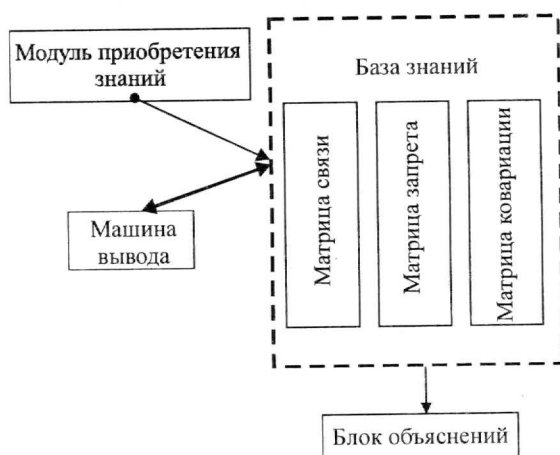


## Объектно-ориентированная диагностическая экспертная система «МАЛЭКС»

А.Л.Ездаков

Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)

При работе сложных технических комплексов возникает ряд задач, связанных с диагностикой неисправностей и сбоев. Задачи локализации и устранения неисправностей решаются с применением сложных технических средств контроля и диагностики квалифицированными работниками ремонтных служб, использующими накопленный профессиональный опыт и знания. В этой ситуации, как и в других, где решение задачи требует применения знания и опыта, целесообразно использовать диагностические экспертные системы [1].



Структура ЭСТОП

Рассмотрим принципы функционирования и структуру одного из видов экспертных систем, названных экспертными системами типа объект-признак (ЭСТОП), на примере разработанной экспертной системы «МАЛЭКС». Структура таких систем приведена на рисунке.

База знаний ЭСТОП состоит из наборов символьной информации двух типов: объектов и признаков. Каждое из этих множеств может быть структурировано в зависимости от уровня дифференцирования по требуемой глубине решения (глубине определения объекта). При этом структура базы знаний иерархична, понятие более высокого уровня объединяет в себе группу понятий более низкого уровня. Кроме того, в состав базы знаний ЭСТОП входит матрица связи (МС), элементы которой указывают на наличие и отсут-

ствие, или в вероятностном случае – «уровень наличия», каждого признака для каждого объекта. Элемент МС  $a_{ij}$  в детерминированном случае может принимать следующие значения:

- 1) «0», если  $j$ -й признак отсутствует у  $i$ -го объекта;
- 2) «1», если  $j$ -й признак присутствует у  $i$ -го объекта;
- 3) «—», если  $j$ -й признак не связан с  $i$ -м объектом.

В вероятностном случае  $a_{ij}$  указывает вероятность наличия  $j$ -го признака у  $i$ -го объекта.

Важными элементами базы знаний ЭСТОП являются матрица запрета (МЗ) и коэффициенты корреляций. МЗ отражает апостериорные связи между признаками и вместе с коэффициентами корреляций участвует в определении оптимального признака.

Заполнение базы знаний ЭСТОП происходит в три этапа. Первый – этап начального заполнения. На этом этапе эксперт при участии инженера по знаниям вводит в систему множества объектов, признаков и элементов МС в диалоговом режиме с использованием многоуровневого меню. Второй этап – активное обучение («игра»). На данном этапе эксперт самостоятельно работает с системой, задавая описания возможных ситуаций и проверяя на них работу системы, при этом происходит пополнение множеств объектов и признаков, коррекция элементов МС, формирование МЗ и первичных коэффициентов корреляции. Третий этап, который можно также определить как этап самообучения, – процесс функционирования экспертной системы в реальной ситуации. На данном этапе идет постоянное накопление данных, их статистическая об-

работка и сопоставление с имеющимся знанием. В случае поступления данных, находящихся в противоречии с установленным системой запрета и коэффициентами корреляции, происходит более полная проверка ситуации. В результате проверки возможно отклонение данных как неверных (неточных) или изменение описанной МЗ системы ограничений –запретов.

Поиск решения в ЭСТОП осуществляется машиной вывода прямым путем от посылок к цели. На каждом шаге решения задачи происходит выбор оптимального признака. Оптимальность признака определяется по ряду критериев, учитывающих состояние базы знаний и на основе данных, поступивших к этому моменту в систему. Одним из основных показателей оптимальности является разделение множества по принципу «деление множества пополам».

Система проверяет выбранный признак либо в диалоге с пользователем, либо путем опроса некоторых подчиненных устройств (датчиков). В результате проверки признака происходит разбиение объектов на множества трех типов:

- 1) достоверные (в детерминированном случае полностью подтвержденные);
- 2) вероятные (в детерминированном случае имеющие не более двух опровержений);
- 3) недостоверные (исключаемые из рассмотрения).

Конечной целью работы ЭСТОП является выделение подмножества достоверных объектов и предъявление его в качестве ответа на поставленную пользователем задачу. Решение может быть достигнуто на разных уровнях (класса, подкласса, конкретного объекта) в зависимости от количества и качества полученной системой информации.

В любой момент работы ЭСТОП пользователь может прервать процесс поиска решения и затребовать объяснения пройденного системой пути. Блок объяснения ЭСТОП предоставляет пользователю информацию в виде описания пути, пройденного системой по дереву решений от начальной вершины до точки прерывания процесса, а также описания состояния системы и состава каждого из трех указанных типов множеств.

В отличие от экспертных систем общего типа [2], ЭСТОП имеют следующие особенности:

- ЭСТОП оперируют в основном численными данными, что существенно расширяет возможности применения стандартных методов математического формализма;
- возможна реализация ЭСТОП с помощью алгоритмических языков программирования типа C++, Pascal, ФОРТРАН;
- ЭСТОП носят диагностический характер и имеют узкую область применения, где связи типа объект–объект гораздо слабее связей типа объект–признак.

Разработанная экспертная система «МАЛЭКС» является объектно-ориентированной ЭСТОП, написанной на языке программирования ФОРТРАН-77 с «пустой» базой знаний, сформированной машиной вывода и дружественным интерфейсом. База знаний может содержать информацию о 300 объектах по 300 признакам. На данном этапе разработки системы связи между объектами и признаками детерминированы.

В настоящее время разрабатывается более мощная система типа объект–признак, проект которой носит условное название «БОЛЭКС».

### Литература

1. Экспертные системы / Под ред. Р.Форсайта. – М.: Радио и связь, 1987. – С. 260.
2. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб.: Питер, 2000. – С. 382.

Поступило  
18 апреля 2008 г.

**Ездаков Андрей Леонидович** – доцент кафедры проектирования и конструирования интегральных микросхем МИЭТ. Область научных интересов: искусственный интеллект, экспертные системы.

# КОНФЕРЕНЦИИ. ВЫСТАВКИ

УДК 658

## Выбор тактики и стратегия производства изделий электроники (выставка «Продуктроника – 2007», г. Мюнхен, Германия)

*В.Д.Вернер, А.Н.Сауров*

НПК «Технологический центр» МИЭТ

*А.А.Резнев*

НИИ-1 (г. Москва)

Проведен анализ экспозиции выставки «Продуктроника – 2007», которая является одной из ведущих выставок технологического оборудования для производства изделий электронной техники.

Влияние электронной промышленности на мировую экономику постоянно возрастает. Это связано с высокими темпами роста рынка ее продукции. В 1960 г. этот рынок оценивался в 17 млрд долл. США. В 2007 г. он вырос до 1600 млрд долл. США, т.е. средний годовой рост составил  $10 \pm 2\%$ .

Развитие изделий электронной промышленности определяется темпом развития электронной компонентной базы (ЭКБ). Главенствующую роль в ней играет кремниевая компонентная база (2/3) и прежде всего изделия микроэлектроники. Ее определяющим компонентом является транзистор, 60-летний юбилей которого был отмечен в конце 2007 г. В настоящее время на каждого жителя Земли производится в среднем 900 млн транзисторов. Общая сумма производства  $6 \cdot 10^{18}$  транзисторов в год. Но именно полупроводниковая составляющая ЭКБ не является рыночно стабильной, а развивается по циклам роста и падения. Рост может быть достаточно плавным (1990–1995 гг.) или более резким (1999–2000 гг.), но спад всегда происходит обвально (1995 г. и особенно 2001 г.). Производство кремниевых пластин и оборудования для полупроводникового производства практически повторяет эту цикличность. Определенную демпфирующую роль играет загруженность оборудования производства ИС. В 2000 г. она составляла 95,3%, а в 2001 г. упала до 71,9%, для периода 1994–2010 г. загруженность принимается в среднем 88%. Показатели послед-

них лет (2004 г. – 92,2%, 2005 г. – 89,7%, 2006 г. – 90,1%), воспринимаются как показатели стабильного развития. При оценке ситуации необходимо учитывать тенденции развития рынка ЭКБ по его регионам и секторам (рис. 1–4) [1].

Из данных, представленных на рисунках, видно, что:

- доля полупроводниковых приборов ЭКБ составляет 66,5% производства;

- в производстве полупроводниковых приборов главенствуют страны Южной Азии (49%);

- в общем объеме производимой ЭКБ страны ЮВА занимают ведущую позицию (47,5%);

- подтверждается тенденция роста доли производства ЭКБ стран ЮВА и соответственно падение доли США и Европы;

- Япония, США и Европа вносят приблизительно равные доли в производство ЭКБ, что суммарно равно доле Южной Азии.

Ситуация на рынке ЭКБ отслеживается аналитическими фирмами по месяцу, кварталу и году. Их цифры могут различаться, но качественная тенденция оценивается более или менее одинаково. По данным американской фирмы WSTS на октябрь 2007 г. квартальный рост по регионам следующий: США – 11,2%, Европа – 10,3%, Япония – 10,3%, Азия – 13,6%; среднее значение составляет 12%. Вместе с тем годовой рост: США – 3,1%, Европа – 2,2%, Япония – 6,6%, Азия – 8,5%; среднее значение – 5%.

346,9 8,40% 376 6,90% 402

47,3	10,50%	52,3	6,10%	55,5	Печатные платы и соединения
41,4	6,00%	42,6	2,60%	43,8	Электроме- хани- ческие элементы
30,7	8,70%	33,4	6,10%	35,4	Пассивные элементы
227,5	8,90%	247,7	7,90%	267,3	Полупроводники
2005		2006		2007	

Рис. 1. Мировой рынок ЭКБ 2005 – 2007 гг. (продукт в млрд долл. США)

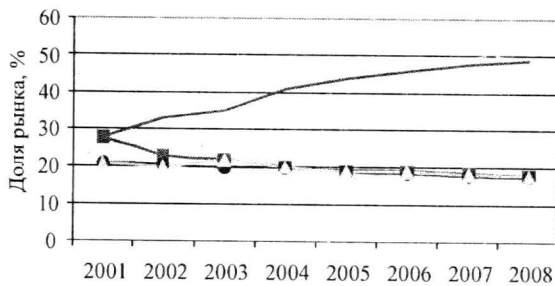


Рис. 3. Мировой рынок ЭКБ: —■— Америка; —●— Европа; —▲— Япония; —×— Азия

Европейская аналитическая фирма ESIA дает несколько более высокие оценки роста европейского рынка (4,4%), но с учетом падения курса доллара относительно евро происходит падение на 3,5%. По оценкам немецкого общества инженеров-электротехников (ZVEI), в 2006 г. рынок ЭКБ вырос на 8%, в 2007 г. на 5%, а в 2008 г. ожидается рост на уровне 6%. Таким образом, несмотря на месячные и квартальные колебания объема рынка, годовой рост должен стабилизироваться на уровне 5–6%. Следует отметить, что из-за постоянного снижения цен на изделия рост рынка в денежном выражении сопровождается гораздо большей величиной роста числа изделий. В этой сравнительно стабильной обстановке на рынке ЭКБ существенным становится выбор тех секторов электроники, где применение ЭКБ дает наибольший эффект, например фотовольтаика, полимерная электроника, микросистемная техника. Расширение областей применения электронной компонентной базы зависит от расширения производства аналоговой электроники, что видно из представленной таблицы.

Наибольший рост объема рынка аналоговых схем к 2010 г. предполагается у стандартных схем (39,7%), телекоммуникационной (28%) и автомобильной электроники (12,2%). Уменьшение объема сектора бытовой техники к

346,9 8,40% 376 6,90% 402

152,7	12,50%	171,8	11,10%	190,8	Южная Азия
64,3	5,50%	67,8	3%	69,9	Япония
65,8	7,50%	70,7	2,60%	72,6	США
64,1	2,40%	65,6	4,80%	68,7	Европа, Ближний Восток, Африка
2005		2006		2007	

Рис. 2. Мировой рынок ЭКБ 2005 – 2007 гг. (продукт в млрд долл. США)

227,5 8,90% 247,7 7,90% 267,3

103,4	12,70%	116,5	12,50%	131	Южная Азия
44,1	5,30%	46,4	3%	47,8	Япония
40,7	10,30%	44,9	3,3%	46,4	США
39,3	1,60%	39,9	5,50%	42,1	Европа, Ближний Восток, Африка
2005		2006		2007	

Рис. 4. Рынок полупроводников (продукт в млрд долл. США)

2010 г., вероятно, связано с экспансией цифровой техники в изделия бытовой техники (например, цифровые микрофоны мобильных телефонов и т.д.).

Выставка «Продуктроника» в Мюнхене проходит один раз в 2 года, чередуясь с выставкой «Электроника» [3]. Престиж обеих выставок в мире очень высок. По уровню представительств каждая из этих выставок является весьма эффективным форумом. Обе они ориентированы на конечного потребителя. Выставка «Электроника» дает ответ на вопрос, какую компонентную базу нужно выбрать для лидерства или укрепления своих позиций в производстве электронной продукции, а выставка «Продуктроника» показывает, с помощью каких технологий и оборудования можно наиболее эффективно обеспечить производство. Основной принцип выставок – организация диалога между производителем и потребителем.

На выставке было представлено 1484 экспозиции из 35 стран, включая как ведущие фирмы (ERSA, Komax, Panasonic, Rohclcd, Schwarg, Rohwedder, Samsung, Siemens, Tyco Electronics, Suss и др.), так и множество малых и средних фирм. Представительство иностранных фирм (относительно Германии) увеличилось от 38% в 2005 г. до 40% в 2007 г. Аналогично доля иностранных посетителей выросла

Изменения рынка аналоговых компонентов в 2006–2010 гг. [2]

Сектор рынка	Рост объема продаж к 2010 г., %	Рост (2007–2010 гг.), %	Рост (2006–2010 гг.), %
Коммуникации	28	29,1	14,6
Автомобильная электроника	12,2	27,7	51,9
Компьютеры	8,3	22,4	15
Промышленность	4,3	18,4	6,9
Бытовая техника	7,5	7,2	–5,8
Стандартные аналоговые схемы	39,7	27,7	33,2

от 41% (2005 г.) до 45% (2007 г.), хотя общее количество посетителей уменьшилось от 43113 в 2005 г. до 40000 в 2007 г. Это связано с тем, что выставка стала более ориентированной на профессионалов, большая часть которых (95%) высоко оценивают ее уровень [4].

При анализе экспозиции выставки следует обратить внимание на некоторые общие моменты. Определенный рост рынка электроники в 2007 г. и ожидание его продолжения в 2008 г. должен обеспечить интерес к продукции фирм, производящих оборудование для изготовления аппаратуры. В условиях постоянного прессинга снижения цены продукции как главного фактора конкуренции очень важен выбор размещения производства и региона для сбыта продукции. Не случайно в первый день выставки была проведена часовая дискуссия на тему: «Роль Китая, Индии и Восточной Европы в продукции электроники». На ней выступили представители руководства таких фирм, как Siemens, Tyco Electronics, Orbotech Europe, Panasonic, Atotech Deutschland. Дискуссия транслировалась по телевизионным каналам. Содержание дискуссии можно проиллюстрировать несколькими выдержками: «... частичный сдвиг исследований и разработок к новым местам ...», «... расширение инфраструктуры как в Китае, так и частично в Индии ...», «... явно наблюдается тенденция соблюдения западных стандартов в новой продукции стран Дальнего Востока ...», «... возрастание понимания необходимости защиты интеллектуальной собственности и марки (бренда) ...». Таким образом, Китай и Индия – это не только гигантский рынок, но и страны, где создаются условия приближения к этому рынку высокотехнологического производства. Вместе с тем участники дискуссии сошлись во мнении, что Восточная Европа для производителей из Западной

Европы должна играть в ближайшем будущем существенную роль в продвижении инноваций на рынок. Географическая и культурная близость и политическая стабильность в странах этого региона делают их привлекательными для западных инвесторов. С точки зрения диверсификации выбора рынка и мест производства, исходя из профиля и интересов компании, могут быть привлекательными и такие страны, как Вьетнам, Малайзия и Таиланд. Роль России в этой проблеме не обсуждалась.

К разряду таких же ролевых мероприятий относится распространение документа, подготовленного профессором информатики университета г. Ульм, лауреатом премии «Планетарного признания» (Planetary Consciouners Psize) 2004 г. Ф.И. Радемахером. В нем отмечалось, что современное состояние характеризуется ростом народонаселения и социальной напряженности, конфликтами разных культур, ухудшением экологии. В этих условиях электроника, компьютеры и сети играют особую роль в качестве «нервной системы» организма человечества. Развитие будущего должно происходить на фоне коллапса биосферы, «бразилизации» экономики и выхода на новое равновесие экосоциальной мировой экономики за счет реализации «Глобального плана Маршалла». Наследие является просто образом планируемых совместных действий мирового сообщества.

Прокомментируем введенный термин «бразилизация». Модель развития экономики Бразилии западные специалисты считают новой, отличающейся от модели развития экономики стран Дальнего Востока. За 2006 г. объем продаж на рынке электроники вырос на 12% и увеличился в 2007 г. до 15%. Экспорт мобиль-



ных телефонов достиг 2,7 млрд долл., автомобильной электроники – 623 млн долл. Импорт электронных компонентов превысил 3,3 млрд долл. и компонентов для телекоммуникаций более 2,4 млрд долл. С помощью различных форумов посетителя выставки готовят к позиции, с которой он должен воспринимать экспозицию.

Рассмотрим тематические разделы выставки и сопровождающие их форумы и семинары.

**Электроника на органических материалах («Organic Electronics»).** Основное внимание уделено продукции на основе гибких полимерных подложек, которые играют существенную роль в производстве таких продуктов, как «умные» карты, «электронная бумага», этикетки для товаров и продуктов. Эти изделия должны выпускаться в большом объеме при минимальной цене. Эта область в более широком аспекте ассоциируется с так называемой «печатной» электроникой, которая имеет объем рынка в 118 млрд долл. США. Ожидается, что в ближайшие 10 лет этот сектор рынка вырастет более чем в 40 раз до уровня 48,18 млрд долл. Органическая электроника не заменяет традиционную кремниевую электронику, а расширяет область ее применения. Изделия могут быть более тонкими, легкими, а главное гибкими. Это позволит изготавливать рулонные солнечные батареи или носимые на теле устройства медицинской диагностики. Полимерные пленки могут быть использованы как подложки для традиционных ИС (чип в полимере). Полимеры рассматривают как перспективные материалы для нанoeлектроники (нанопроволочные транзисторы) и наносенсорники (датчики дыма с чувствительностью на уровне отдельных молекул). В целом электроника на органических материалах имеет широкий спектр приложений: полупроводники, дисплеи, блоки памяти, сенсоры и фотовольтаика. В связи с ее высокой перспективностью основные экспозиции были представлены вместе с разделом «Микронаномир». В этой области, как это принято на Западе, для перспективных технологий образовано объединение фирм и организаций «Ассоциация органической электроники» (Organic Electronics Association – OE A [1]). По ее прогнозам ожидается поэтапный рост рынка: к 2011 г. – 5,06 млрд долл. США, к 2017 г. – 48,18 млрд долл. США и к 2027 г. – 300 млрд долл. США. В ассоциации свыше 80 членов, часть из которых занимает

ведущие позиции в этой области электроники. Выделены 7 направлений развития: органическая фотовольтаика; печатная память; печатные устройства радиоидентификации (RFID); гибкие батареи; органические тонкопленочные транзисторы (O-TFT) для дисплеев; органические сенсоры; интеллектуальные изделия. Бесспорным преимуществом органической электроники является легкость и гибкость подложек, на которых формируют электронные схемы, а также простота технологии формирования структуры прибора. Однако стоимость материалов с нужными параметрами пока остается проблемой (стоимость пленки и «чернил»). В связи с этим тезис о низкой стоимости справедлив только для простых изделий типа «электронных этикеток». Для транзисторных структур разработаны *p*-материалы и осваиваются *n*-материалы. Такой важный параметр как подвижность носителей существенно ниже, чем даже у  $\alpha$ -Si и только к 2017 г. ожидается выход на уровень подвижности  $\text{Si}^*$  ( $5\text{--}10 \text{ см}^2/\text{Вс}$ ). К настоящему времени изготовлено более 64 тыс. дискретных устройств органической электроники. В области схем памяти ставится задача изготовления энергонезависимой оперативной памяти (NV-RAM) на 100–1024 бит. Для электронных этикеток изготовлена память на 15 бит. Наибольший рыночный вес среди изделий органической электроники принадлежит наиболее развитой продукции – дисплеям на базе органических светоизлучающих диодов (OLED). В прогнозе на 2014 г. объем их продаж составит 13,8 млрд долл. США из общего объема рынка 34,4 млрд долл. США. Второе место принадлежит RFID. Доля сенсоров, игр и светоизлучателей характеризуется суммами 1,6; 1,4; 1,2 млрд долл. США соответственно. Следует отметить, что выбор технологического процесса изготовления напрямую связан с выбором материала подложки и способа нанесения (печати) структуры, т.е. их нельзя выбирать по отдельности и произвольно. Главенствующую роль в настоящее время играют материалы. Предлагаемый спектр их позволяет изготовить комплексное изделие на основе органических материалов. Например, фирма BASF [5] предлагает материалы для органической электроники, аккумуляции  $\text{H}_2$ , а также новые катодные материалы для литиевых и солнечных батарей, термоэлектрических при-

боров, магнитокалориметрических устройств антибактериальных покрытий и «умного» текстиля. Особое значение имеет возможность сочетания технологии органических материалов с нанотехнологией. Таким образом, органическая и печатная электроника являются перспективными направлениями электроники.

**Фотовольтаика.** Центральное место в фотовольтаике занимают стандартные и тонкопленочные солнечные батареи и модули, для которых предлагались комплектные производственные модули и чистые помещения. Вторым направлением в этой области было технологическое оборудование для производства дисплеев. Интерес к солнечным батареям непрерывно растет из-за роста стоимости электроэнергии. В Германии в 2004 г. солнечными батареями было произведено 597 МВт электроэнергии (в 2005 г. – 912 МВт), в Японии – 290 МВт, в США – 100 МВт. 20% всех солнечных батарей поставляет Германия. Общий объем их производства на мировом рынке составляет 6,5 млрд долл. США, в 2012 г. ожидается рост до 16,4 млрд долл. Предполагают, что к 2009 г. традиционные солнечные батареи на объемном кремнии будут в значительной мере вытеснены тонкопленочными солнечными батареями на стекле. В этом случае трехслойные пленки могут работать в разных спектральных областях и более полно использовать энергию Солнца. Переход на пленочную технологию позволяет расширить номенклатуру материалов солнечных батарей, например CdTe- или CuInSe<sub>2</sub>-пленки. Толщина последних всего несколько микрон вместо кремниевых пластин толщиной 0,3 мм. К 2030 г. общий объем энергии от солнечных батарей достигнет 100 ГВт.

**«Зеленая электроника» (Green Electronics).** Раздел выставки связан с предложением технологий и оборудования, которые давали бы минимальный объем вредных выбросов и отходов.

**«ЭМС Долина» (EMS Village).** Сервис электронного производства стал постоянно развивающимся сектором электроники, который включает аутсорсинг и контрактные производства разных форм организаций. Этот раздел обязательно присутствует на последних выставках «Электроника» и «Продуктроника». Концентрация фирм, работающих в этом направлении, в одном павильоне удобна для потенциальных заказчиков. За 2006 г. в Европе объем

услуг EMS вырос с 21,4 млрд долл. в 2005 г. до 25,1 в 2007 г. Рост составил 11,5% (до 33 млрд долл. в 2008 г.). Напомним, что объем продаж изделий электроники в 2006 г. вырос на 12,2% и достиг 1504 млрд долл., что в основном связано с азиатскими странами. При оценке ситуации на промежуток в несколько лет предполагается средний рост около 10%. При этом основной вклад (до 90%) будет давать прирост таких секторов, как компьютеры, телекоммуникации и бытовая техника. В 2006 г. распределение продаж по секторам было следующим: компьютеры – 30,5%; коммуникации – 24,4%; бытовая техника – 11,3%; военная техника – 9%; промышленная техника – 9,2%; инструменты – 6,4%; автомобили – 6,2%; бизнес – 2,9%. Первые три сектора составляют 66,2%. Этим и объясняется их влияние на рост общего рынка. Преимущества традиционной фрагментации электронной промышленности на фирмы, производящие собственные разработки (OEM – original electronic manufacturing), и фирмы, обеспечивающие производство несобственных разработок, прежде всего сервис электронного производства (EMS – electronic manufacturing servis), стали очевидными после резкого обвала рынка электроники в 2001 г. Гигантские размеры фирмы не всегда гарантируют ее рыночную устойчивость. Наличие EMS позволяет заказчику (OEM) снизить риск коммерциализации. Другие формы обслуживания электронного производства также имеют определенные ролевые функции. Например, производители разработанного заказчиком продукта (ODM – original design manufacturers), выпускаемого с торговой маркой заказчика, должны снизить риск продаж. 77% фирм такого рода расположены на Тайване. «Независимые центры проектирования» (IDN – independent design house) проводят проектирование для заказчика (OEM). Комплекс фирм (IDN+EMS) может работать в кооперации. После проведения разработки (IDN) начинает работать производство (ODM) и таким образом выполняются функции поставщика EMS.

Фирма KPM (Klaus Pidal Management) исследовала рынок EMS в Европе (свыше 1500 компаний) и установила, что специализация в узком сегменте приобретает все большее значение, особенно если это связано с специфической сертификацией или требованием особых

«ноу-хау». В связи с этим выпущенный фирмой обзор может служить хорошим справочником для потребителей EMS. По оценке фирмы, к 2010 г. рынок EMS достигнет 400–430 млрд долл. с годовым ростом 10–12%. Прогнозируются новые сектора для EMSODM: создание пилотных образцов, послепродажный сервис, автомобильная и медицинская электроника. В секторе EMS будет увеличиваться роль стран Азии. ODM будет развиваться на европейском и американских рынках. Как показал опыт прошлого десятилетия, ценовой аргумент в выборе форм производства (OEM, EMS, ODM) имеет меньшее значение, чем приближение к рынку и заказчикам.

**«Производственная логистика и технологии материальных потоков» (Production Logistics and Material flow Technology).** Этот раздел был впервые организован на «Продуктронике – 2007». Он связан с маршрутизацией потоков комплектующих и продукции, эффективным планированием ресурсов на предприятии (enterprise resource planning – ERP), а также системой материально-технического обеспечения (material/manufacturing execution system) производства.

**«Микронаномир» (Micro-NanoWorld).** Этот раздел был введен на мюнхенских выставках в последние два года и по замыслу организаторов должен представлять ориентированную на будущее микропродукцию с размерами до нанодиапазона. Он включает экспозиции по материалам, процессам производства микросхем, микросборку и соответствующие технологии тестирования и измерений. Годовой рост рынка МЭМС оценивается фирмой WTS равным 10,5% [2], но по отдельным типам этот рост более значителен: МЭМС-микрофоны – 30%; РЧ МЭМС – 20%; контактные карты – 18%; гироскопы – 14%. Разделение рынка по секторам изделий выглядит так: головки принтеров – 30%; датчики давления и скорости потока – 20%; инерциальные датчики – 16%; МОЭМС – 13%. Распределение рынка по секторам потребителей: 32% – периферийные устройства информационной техники; 22% – автомобильная промышленность; 20% – промышленность, авиация, энергетика; по 10% – медицинская и бытовая техника. Производство МЭМС в основном сосредоточено на 30 ведущих предприятиях. Лидером является Texas Instrument с годовым объемом продаж 905 млн долл. США (2006 г.). Hewlett Packard, Canon, Robert Bosch производят

соответственно продукции на 500, 427 и 374 млн долл. США. Замыкает список фирма Melexis с объемом продаж 28 млн долл. США. Как и в производстве ИС, постоянно увеличивается (на 30%) объем услуг кремниевых МЭМС-мастерских и в 2006 г. он достиг 131 млн долл. Лидерами являются фирмы IMT (21 млн долл.), ARM (17,5 млн долл.) и Dalsa Semiconductor (16 млн долл.) [6]. Большая номенклатура изделий микрообработки при сравнительно малом объеме их продаж послужили стимулом роста производства малогабаритного комплексного оборудования. Около 230 компаний представили оборудование производства, испытаний и тестирования микропродукции для автомобильной промышленности, механического оборудования, коммуникаций и медицинской техники и электроники. В их числе установки для литографии, микроперемещений и позиционирования. Среди этих фирм AMI DODUCO, CarlZeiss, FDK Devotec, Laser 2000 3D – Micromac, LEONI, LPKE Laser @ Electronics, Newport Spectra – Physics, Physics Instrumente, Rofin-Sinar, TRUMPF-Laser, 7 фраунгоферских институтов [7]. С учетом представленного на выставке оборудования и конструкций для мини-чистых комнат и объемов возникает возможность, в том числе у малых и средних фирм, организовать свое собственное производство на небольших площадях и при сравнительно небольших затратах, не имея собственного оборудования. Например, фирма IWB [8] при техническом университете г. Мюнхена предлагает услуги по телевизионному управлению своего парка оборудования удаленным оператором. Несмотря на общий прогресс различных направлений электронной техники, включая МЭМС, ряд процессов остаются определяющими для производства. К их числу относятся сборка и корпусирование, которые вносят основной вклад в стоимость прибора [6]. Стоимость одного вывода практически не меняется в течение ряда лет. Применение контактных столбиков (шариков) в флип-чип-технологии позволяет уплотнить сборку, но при этом число контактов остается большим. Например, в сборке для проекта Атлас в ЦЕРНЕ, разработанной фраунгоферским институтом IZM, было размещено 16 ИС на площади 7,5×2 см с общим числом контактных столбиков 46 000. В борьбе с «тиранией» соединений основное значение

имеет переход от компонентов к системам. Система-на-кристалле в значительной мере решает проблему. Однако для многих разработчиков систем, особенно малотиражных, более приемлемым решением является система в корпусе и многоуровневая сборка: кристалл-на-кристалле или корпус-на-корпусе. Именно эта технология была предметом специальной экспозиции и демонстрации на выставке. Все более очевидной становится общая тенденция перехода к 3D-сборке, при которой достигается максимальная объемная плотность упаковки на обеих сторонах сборочной платы. В ней могут размещаться не только проводники, но и компоненты. В качестве подложек может быть использована и пластина кремния. Фирма Strand [9] с 1997 г. выпускает такие подложки на пластине диаметром 200 мм с четырьмя слоями металлизации, которые обеспечивает 3D-сборку. Заметим, что однослойная сборка кремний-на-кремнии на несколько лет раньше была освоена в НПК «Технологический центр» МИЭТ.

К числу инноваций, представленных на выставке, можно отметить проект «Microflow» фирмы Seho System и фраунферского института IZM, выполняемый при государственной финансовой поддержке. Обычный конвекционный нагрев для оплавления припоя используется только для предварительного нагрева. Непосредственное оплавление производится локально СВЧ-нагревом. Снижение общего термического баланса позволит использовать этот метод для монтажа в полимерной электронике. Проблемы межсоединений на гибкой плате обсуждались также в связи с технологией формирования межсоединений приборов (Molded Interconnect Devices – MIDs) для многослойных плат. Основная проблема заключается в пригодности разных видов этой технологии для массового производства. Предлагают двухкомпонентный спрей-метод (2E micatronic), метод прямого лазерного структурирования (LPKF) и метод запрессовки фольги (Harting Mitronics). Все они имеют ограничения из-за их производительности или стоимости материала. Например, в технологии фирмы LPKF необходима пленка, содержащая металлокомплексные соединения, которые переходят в проводящее состояние под действием лазерного излучения. Общей проблемой является пока недоказанная надежность таких соединений. Аналогичная проблема на-

дежности возникает при расположении части компонентов не на поверхности, а внутри платы. В принципе размещение тонких кремниевых кристаллов внутри платы достаточно хорошо освоено для карт различного назначения. Для широкого класса аппаратуры желательно расположение внутри платы пассивных элементов: конденсаторов, резисторов, катушек. Разработаны материалы для таких компонентов. Но часто возникает проблема поддержки нужных номиналов компонентов, находящихся внутри платы. В связи с появлением таких многослойных конструкций особое значение приобретают методы контроля с использованием рентгеновского излучения или совмещения оптической и рентгеновской инспекции сборки (например, установка X7056 АОХI фирмы Viscom). Автоматизированный оптический (AOI) и рентгеноконтроль сборок МЭМС-датчиков является необходимым условием массового производства. 80% дефектов сборок связано с шаблонами и могут быть выявлены оптически. Фирма Esra разработала установку оптического контроля со скоростью 9100 мм<sup>2</sup>/с. Рентгеновская инспекция (AXI) более медленная, но позволяет провести контроль по трем измерениям. Специализируясь на рентгеновских установках контроля, фирма Viscom предложила установку X7050, объединяющую эти технологии. Фирма Siiss MicroTec представила ряд установок на базе спрей-технологии для нанесения полос резиста шириной 200 мкм. Совместно с IBM разработаны три установки для спрей-технологии формирования контактных столбиков. В этом случае столбики формируются в отверстиях стеклянной подложки и переносятся на полупроводниковую подложку при соответствующей термообработке. Стеклянный шаблон затем удаляется. Эта же фирма разработала установку контроля МЭМС на пластине [6]. Таким образом, потенциальный изготовитель электронных систем должен знать, что помимо приобретения технологического оборудования для основного процесса необходимо приобрести дополнительное оборудование, например для травления металлизированных слоев под флип-чип сборку, блоки «чистых» помещений, контрольно-измерительное оборудование.

Многие фирмы проводили демонстрацию работы оборудования и производственных линий. Аналогичным образом организованы де-



монстрации приложения метода «Системы в корпусе» для конкретного применения в разных условиях. Более глубокую информацию дали пять специализированных форумов, на которых выступило более 100 ведущих экспертов в области производства изделий и оборудования электронной промышленности.

Для эффективной работы нужны не только современное оборудование, но и квалифицированные кадры с современным оборудованием в области системных изделий электронной техники и их технологий. На «Продуктронике – 2007» был проведен специальный подиум, посвященный этой проблеме. Его темой было образование и повышение квалификации лиц старше 45 лет. Принцип «пожизненного» образования давно реализуется всеми ведущими фирмами электронной промышленности. Многие из них имеют свои корпоративные университеты. В Швеции 30% специалистов в возрасте 55–64 лет продолжают свое образование, в Германии обучается только 3% этой возрастной группы, что и послужило поводом обсуждения проблемы на подиуме. В то же время в Германии уже существует специальный институт удаленного образования (ILS) с 65 тыс. обучаемых. В СССР действовала разветвленная сеть отраслевых

центров повышения квалификации. В настоящее время система повышения квалификации практически не действует. Ее отсутствие создает дополнительные трудности при осуществлении планируемого прорыва в области высоких технологий.

Обзор экспозиций «Продуктронике–2007» фрагментарен, отмечается общий вектор развития электроники – переход к системному уровню изделий. Расширение спектра этих изделий дает шанс развития не только для гигантов микроэлектроники, но и малых и средних фирм, в том числе и российских. Развитая глобальная инфраструктура электроники способствует скорейшему выходу на рынок разработанной продукции. Наибольший успех может быть обеспечен при правильно выбранной нише, даже очень узкоспециализированной. Вместе с тем его производство должно быть ориентировано на технологические процессы, уже получившие широкое распространение или перспективные для такого же широкого применения. Современная система ЕМС обеспечивает быстрый и надежный доступ к таким технологиям. В качестве примера приведем спрей-технологию, которая используется как в традиционной технологии печатных плат, так и в органической электронике [10].

### Литература

1. <http://www.vdma.org>
2. <http://www.sia-online.org>
3. Вернер В.Д., Ильков А.В. // Инновации для инноваций (выставка «Продуктроника – 2005 г.» Мюнхен, Германия) // Изв. вузов. Электроника. – 2006. – № 3. – С. 89–92.
4. Productronica. Day 1–4, 2007 // Markt & Technik.
5. <http://www.basf-fb.de>
6. I. Mahatey // MEMS Packaging – The Saga Continues // MEMS Manufacturing. July 2006. – P. 25–27.
7. [www.izm.fraunhofer.de](http://www.izm.fraunhofer.de)
8. [www.ibw.tum.de](http://www.ibw.tum.de)
9. [www.strandinterconnected.com](http://www.strandinterconnected.com)
10. A. Hubler, M. Bartsch, H. Kempa // Printed Electronics // Nanos. The Nanotech Journal. 03.07. – P. 39–43.

**Вернер Виталий Дмитриевич** – доктор физико-математических наук, профессор, председатель технического совета НПК «Технологический центр» МИЭТ. Область научных интересов: микро- и наноэлектроника, микросистемная техника.

**Сауров Александр Николаевич** – доктор технических наук, профессор, директор НПК «Технологический центр» МИЭТ. Область научных интересов: микро- и наноэлектроника, микросистемная техника.

**Резнев Алексей Алексеевич** – доктор технических наук, профессор, директор НИИ-1. Область научных интересов: радиотехнические приборы и системы.



## Об итогах 15-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика - 2008»

В целях развития научно-исследовательской работы студентов и аспирантов, обмена идеями и научно-техническими достижениями в области электроники, нанотехнологий и информационных технологий в Московском государственном институте электронной техники (техническом университете) 23–25 апреля 2008 г. прошла 15-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2008». Было заявлено более 350 докладов и тезисов из 28 городов России и стран СНГ: Баку (Азербайджан), Барнаула, Белгорода, Брянска, Волгограда, Воронежа, Ижевска, Йошкар-Олы, Казани, Калуги, Киева (Украина), Минска (Белоруссия), Москвы, Новосибирска, Обнинска, Омска, Петрозаводска, Самары, Саранска, Ставрополя, Таганрога, Твери, Томска, Ульяновска, Уфы, Ферганы (Узбекистан), Харькова (Украина), Ярославля. На конференцию поданы материалы из 42 университетов и институтов, в том числе из ведущих вузов Москвы (МГУ им. М.В. Ломоносова, МГТУ им. Н.Э. Баумана, МИФИ, МАИ, МГИЭМ, МГАТХТ им. М.В. Ломоносова, РХТУ им. Д.И. Менделеева, МГУПИ, МГУП) и предприятий г. Зеленограда.

Из 320 человек на 11 секциях (*наноэлектроника, материалы микро-, опто-, акусто- и наноэлектроники, проектирование и технология электронных компонентов, микро- и наносистемная техника, математические модели и алгоритмы в информатике, автоматизированные информационные системы, информационно-управляющие и вычислительные системы и приборы, телекоммуникационные системы и связь, биомедицинская электроника, экологические аспекты микро- и наноэлектроники, менеджмент и маркетинг наукоемких производств*) с докладами выступили 193 человека, в том числе 111 аспирантов, 75 студентов. Вне конкурса было представлено 7 докладов.

К началу работы конференции были изданы Программа конференции и тезисы докладов (Микроэлектроника и информатика – 2008 // Тез. докл. 15-й Всероссийской межвузовской науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – М.:

МИЭТ, 2008. – 360 с.). В сборнике представлены результаты научных исследований по направлениям работы конференции.

На секции «*Нанотехнологии в электронике*» были представлены доклады на актуальные темы наноэлектроники, а также физики низкоразмерных структур. Наибольший интерес вызвала коллективная работа аспирантов и студентов МИЭТ и ФГУП «НИИФП им. М.В. Лукина» Петрухина Г.Н., Молчанова И.А., Мигунова Д.М., Азанова П.В. «Особенности разработки технологии изготовления приборов автоэмиссионной наноэлектроники на основе углеродных наноструктурированных материалов», которая имеет большие перспективы для дальнейшего развития и внедрения в реальное производство.

На секции «*Материалы микро-, опто-, акусто- и наноэлектроники*» рассмотрен достаточно широкий круг вопросов и задач, касающихся следующих областей материаловедения: полупроводниковые материалы; диэлектрические, проводящие и термоэлектрические материалы; углеродные наноразмерные материалы; аналитические и аппаратные методы исследования структуры и свойств материалов.

По сравнению с предыдущей конференцией появилось больше работ, связанных с моделированием технологических процессов и расчетными задачами свойств материалов. Но в то же время ярких и запоминающихся выступлений на секции не было, поэтому первое место конкурсная комиссия никому не присудила.

На секции «*Проектирование и технологии электронных компонентов*» был представлен большой круг актуальных научно-технических проблем в области проектирования и технологии электронных компонентов от теоретических исследований и анализа алгоритмов, используемых в системах автоматизированного проектирования, до решения практических задач обеспечения требуемых конструктивных характеристик изделий микроэлектроники с учетом эксплуатационных факторов. Широко используются методы математического моделирования и современные платформы проектирования ИС от мировых лидеров – компании

Cadence и Synopsys. Особый интерес вызвали работы, связанные с нанообъектами и нанотехнологиями, что подтверждает развитие данного направления и рост практического применения методов нанотехнологий.

На секции «Математические модели и алгоритмы в информатике» были представлены доклады в основном по двум направлениям: цифровая обработка сигналов; математическое моделирование в технических и информационно-измерительных системах.

На секции «Автоматизированные информационные системы» был предложен ряд перспективных с научной и практической точек зрения разработок, направленных на повышение эффективности существующих автоматизированных информационных систем управления и их компонентов в различных сферах человеческой деятельности: интегрированные технологии управления производством, дистанционный процесс обучения студентов, логистика, жилищно-коммунальный сектор и многое другое.

Следует отметить, что уровень участников конференции и их знание последних достижений науки и техники, новых информационных технологий, программного обеспечения и т.д. растет. Значительное количество материалов, представленных на секции, могут лечь в основу диссертационных исследований.

На секции «Информационно-управляющие и вычислительные системы и приборы» большие дискуссии вызвали вопросы создания информационно-вычислительных систем для мониторинга трубопроводов с целью недопущения хищения нефти и газа.

Для создания эффективных методов управления Коряковский И.А. (студ. МП-42, МИЭТ) представил способ объединения методов контурного анализа с вычислениями, производимыми нейронной сетью («Методы контурного анализа теории нейронных сетей для повышения эффективности распознавания объектов»); проведенный компьютерный эксперимент показал, что разрабатываемая система адекватно реагирует на контур входных объектов в достаточно сложной обстановке.

В работе «Программная модель для многокритериальной оценки производительности многоядерных вычислительных систем» (аспиранты Путря Ф.М., МИЭТ и Кучинский А.С., ГУП ППИ «Научный центр») предложен симулятор, позволяющий оценивать производитель-

ность различных конфигураций многоядерных архитектур. Симулятор позволяет обеспечить оптимизацию программ под конкретную архитектуру. Работа имеет большое значение для решения определенного круга задач, где требуется выбор оптимальной архитектуры многоядерной системы. Работа требует продолжения, так как для окончательной оптимизации нужны результаты, полученные на реальном кристалле.

Для решения достаточно значимых научно-практических задач были представлены интересные работы на секции «Телекоммуникационные системы и связь». Среди них работа аспиранта Шинкаренко К.В. (ТУСУР, Томск) «Применение стирающих кодов в системах цифрового телевидения», в которой рассматривается решение проблем для систем цифрового телевидения.

Доклады, представленные на секции «Биомедицинская электроника», продемонстрировали широкий диапазон тематики от работ, имеющих фундаментальную направленность, до прикладных работ. К первым можно отнести работы, связанные с изучением взаимодействия лазерного излучения с рассеивающей биологической средой и разработкой методов томографической реконструкции физических характеристик такой среды, а также работу по применению плоских кодирующих коллиматоров в однофотонной эмиссионной томографии.

Итоги конференции подведены на заключительном пленарном заседании, где выступил заместитель проректора МИЭТ по научной работе В.Ю. Пустовит и руководители секций.

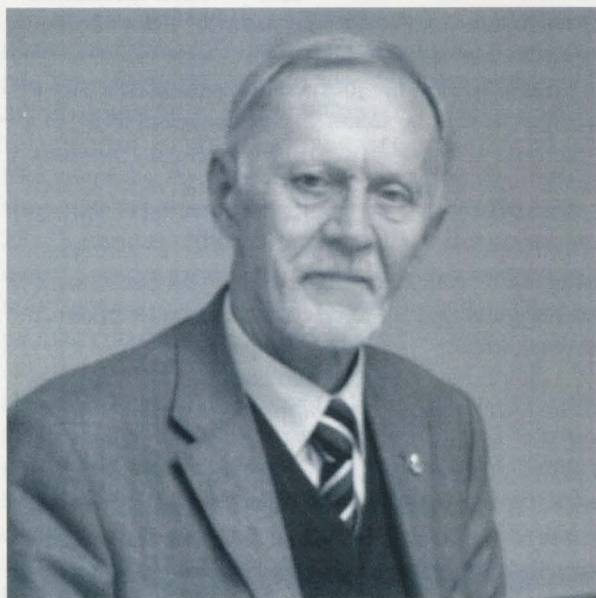
Отмечены достаточно высокий уровень большинства докладов и их прикладное значение для различных отраслей промышленности. Докладчики излагали свой материал с использованием современных телекоммуникационных средств. Работы Кондрашева В.А., Кацоева В.В., Кацоева Л.В.; Зезюлина Д.А.; Медведевой В.А. рекомендованы для участия в программе «УМНИК». Работы Паникова С.С., Зезюлина Д.А. (МИЭТ), Ткачева А.Ю. (ВГУ, Воронеж) рекомендованы для опубликования в сборниках научных трудов МИЭТ.

Конференция способствовала популяризации научных знаний в молодежной среде, а также налаживанию информационных связей (Интернет, электронная почта, непосредственное общение).



# ЮБИЛЕИ

## Орликовскому Александру Александровичу – 70 лет



12 июня 2008 г. исполнилось 70 лет академику Российской академии наук, доктору технических наук, профессору Орликовскому Александру Александровичу.

После окончания в 1961 г. Московского инженерно-физического института он с 1961 по 1963 г. работал в НИИ приборостроения – одном из ведущих институтов в области космического аппаратостроения в СССР; с 1963 по 1966 г. обучался в аспирантуре Московского института электронного машиностроения; диссертационную работу выполнял в НИИ «Пульсар», в котором в это же время были разработаны и изготовлены первые отечественные интегральные схемы. С 1969 по 1981 г. А.А. Орликовский работал старшим преподавателем, доцентом, заместителем заведующего кафедрой интегральных полупроводниковых схем в Московском институте электронной техники, с 1981 по 1988 г. – старшим научным сотрудником сектора

микроэлектроники и заведующим лабораторией микроструктурирования и субмикронных приборов Института общей физики АН СССР. С 1988 г. Александр Александрович работает в Физико-технологическом институте РАН: до 2001 г. – заведующим лабораторией, с 2001 г. – заместителем директора по научной работе, с 2005 г. – директором института. В 2000 г. А.А. Орликовский избран членом-корреспондентом РАН, в 2006 г. – академиком РАН.

Академик Орликовский А.А. является одним из ведущих ученых нашей страны в области физики и технологии элементной базы микро- и нанoeлектроники. Александр Александрович внес значительный вклад в разработку физических и схемотехнических принципов создания ячеек, схем и устройств полупроводниковой памяти. Ему принадлежит ряд пионерских работ в этой области, а их результаты внедрены в промышленных разработках сверхскоростных БИС оперативной памяти (НИИ молекулярной электроники и завод «Микрон»), предназначенных для использования в электронной аппаратуре специального назначения.

С 1981 г. главное направление научной деятельности А.А. Орликовского – исследование физических основ процессов субмикронной технологии кремниевых СБИС, создание новых технологий и технологического оборудования для их производства. Александр Александрович – один из основоположников развития научных исследований в этой области. Под его непосредственным руководством выполнены приоритетные исследования по технологии контактных слоев на основе силицидов металлов, теоретические и экспериментальные работы по плазмохимическому трав-

лению кремния и кремнийсодержащих материалов, работы по созданию новых источников плотной плазмы, по диагностике низкотемпературной плазмы и методам мониторинга плазменных технологических процессов – основы для автоматизации плазмохимического оборудования. Под руководством А.А. Орликовского создан оптический томограф плазмы. Работы по данному направлению завершились созданием экспериментальных образцов автоматизированных установок плазмохимического травления, в том числе для технологии приборов микромеханики, плазмостимулированного нанесения тонких пленок диэлектриков и плазмоиммерсионной ионной имплантации.

Два новых направления научных исследований А.А. Орликовского, осуществляемых совместно с академиком Валиевым К.А., – развитие методов и средств нанотехнологий для создания приборов с использованием квантовых явлений в полупроводниках и исследования в области технологии твердотельных квантовых компьютеров. По первому направлению уже разработаны

технология изготовления нанотранзисторов с длиной канала порядка 10 нм и квантовая модель прибора.

Орликовский А.А. автор более 300 научных работ, в том числе ряда монографий и учебных изданий, а также нескольких десятков патентов на изобретения. Среди его учеников доктора и кандидаты наук, в их числе руководители микроэлектронных исследовательских учреждений и производств.

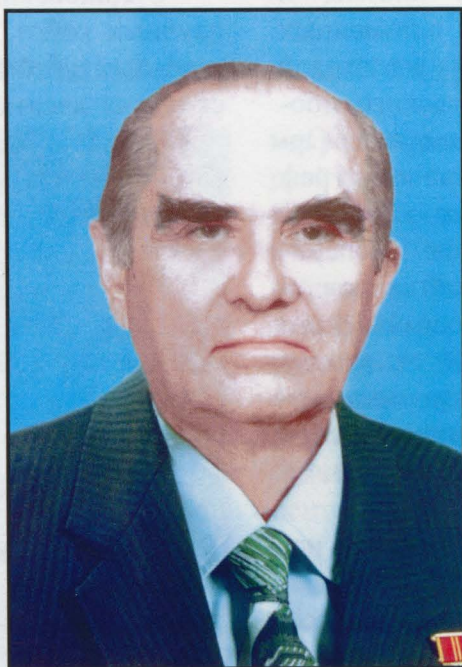
А.А. Орликовский – талантливый организатор науки. Как человек, ученый и гражданин Александр Александрович обладает даром увлекать людей во имя высоких целей, создавать благоприятную творческую обстановку, является бессменным председателем оргкомитета регулярной проходящей при широком участии отечественных и зарубежных ученых Международной конференции «Микро- и наноэлектроника» (ICMNE). Академик Орликовский А.А. член бюро Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН, зам. главного редактора академического журнала «Микроэлектроника», член двух Научных советов РАН, член ряда советов по защитах диссертаций.

***Поздравляем Александра Александровича с юбилеем, желаем крепкого здоровья и плодотворной работы на благо отечественной электроники.***

***Редколлегия***



**К 90-летию со дня рождения  
Преснухина Леонида Николаевича**



(1918 – 2007)

*Первый ректор МИЭТ (1966 – 1988 гг.),  
член-корреспондент Российской академии наук,  
доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки и техники РСФСР,  
лауреат Государственной премии СССР*

Преснухин Л.Н. родился 26 августа 1918 г. в рабочей семье в деревне Харлово, расположенной на реке Волге между старинными русскими городами Калязин и Кимры Калязинского района Тверской (Калининской) области. В 1931 г. переехал в Москву, где в 1936 г. окончил с отличием среднюю школу № 38.

В 1936 г. Леонид Преснухин стал студентом Московского высшего технического училища им. Н.Э. Баумана. Учебу совмещал с работой конструктора в НИИЧЕРМЕТ (по февраль 1941 г.) и далее на заводе № 251 (Наркомат судостроительной промышленности), где выполнял дипломный проект и встретил начало Великой Отечественной

войны. Во время всеобщей эвакуации из Москвы Л.Н. Преснухин переехал в Ижевск, куда были перебазированы завод № 251 и МВТУ. С октября 1941 г. по июль 1942 г. работал на оружейном заводе «Станкострой» (Наркомат вооружения) конструктором станков для оружейного производства. В мае 1942 г. защитил в МВТУ дипломный проект по специальности «Приборы управления стрельбой артиллерии».

С 1942 по 1946 г. Л.Н. Преснухин – инженер, а затем аспирант кафедры П-5 «Математические и счетно-решающие приборы и устройства» МВТУ; с 1945 по 1955 г. работает научным сотрудником НИИ-5 Главного управления Минобороны СССР; в



1946 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование процессов визирования и некоторые схемы механизмов наведения».

С октября 1946 г. Л.Н. Преснухин работал преподавателем (по совместительству) в МВТУ: до 1949 г. – ассистент, с 1949 г. – доцент кафедры П-5; в 1954 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Исследование, расчет и проектирование систем слежения, управляемых человеком»; в 1955 г. ему присвоено ученое звание профессора.

С 1955 по 1957 г. Л.Н. Преснухин был командирован в Китайскую Народную Республику советником ректора Пекинского политехнического института по вопросам, связанным с приборами управления и радиолокационными системами.

С 1957 по 1959 г. Леонид Николаевич – профессор кафедры П-5; с 1959 по 1964 г. – декан факультета «Приборостроение», с 1964 по 1966 г. – заведующий кафедрой П-5 МВТУ.

В августе 1966 г. приказом Министерства высшего и среднего специального образования РСФСР Л.Н. Преснухин назначен ректором МИЭТ.

Леонид Николаевич Преснухин – первый ректор МИЭТ (1966 – 1988), основатель и заведующий кафедрой вычислительной техники (1966 – 1988).

С именем Л.Н. Преснухина связаны организация, становление и развитие МИЭТ. Под его руководством проектировались и строились: основной комплекс зданий института, экспериментальный завод «Протон», корпус-вставка студенческого городка, спортивно-оздоровительные лагеря «Загедан» и «Золотые пески». Леонид Николаевич предложил и реализовал в вузе идею единства учебного процесса, науки и производства, создав уникальный учебно-научно-производственный комплекс МИЭТ.

Л.Н. Преснухин – основатель научной школы в МИЭТ, руководитель 70

кандидатов и 10 докторов наук, автор более 270 научных работ, в том числе 15 монографий и 130 авторских свидетельств на изобретения. Организатор творческих коллективов из числа профессорско-преподавательского состава и ведущих научных работников промышленных НИИ для подготовки и издания научных монографий, учебников и учебно-методических пособий по вычислительной технике, приборам управления и микроэлектронике. Ряд фундаментальных изданий, подготовленных этими коллективами (Преснухин Л.Н., Юдин Д.Б., Серебровский Л.А. Основы теории и проектирования приборов управления. – М.: Оборонгиз, 1960; Преснухин Л.Н., Смирнов Ю.М., Соломонов Л.А., Темнов И.В. Основы расчета и проектирования счетно-решающих устройств. – М.: Высшая школа, 1965; Преснухин Л.Н., Соломонов Л.А., Четвериков В.Н., Шаньгин В.Ф. Основы теории и проектирования вычислительных приборов и машин управления. – М.: Высшая школа, 1970; Преснухин Л.Н., Шаньгин В.Ф., Майоров С.А., Меськин И.В. Фотоэлектрические преобразователи информации для ЭЦВМ. – М.: Машиностроение, 1974; Преснухин Л.Н., Нестеров П.В. Цифровые вычислительные машины: Уч. пособие для студентов вузов. – М.: Высшая школа, 1981), стали классическими в подготовке специалистов по системам управления.

В 1979 г. Л.Н. Преснухин удостоен почетного звания «Заслуженный деятель науки и техники РСФСР», в 1984 г. Леонид Николаевич избран членом-корреспондентом АН СССР, в 1995 г. ему было присвоено звание «Заслуженный профессор МИЭТ».

Л.Н. Преснухин создал и в течение длительного времени руководил отраслевыми лабораториями Минобороны при МВТУ им. Н.Э. Баумана и МИЭТ. Все танки СССР, лучшая в мире боевая машина пехоты БМП-3, самоходный пушечно-ракетный комплекс «Тунгуска», ряд систем управления корабельными ракетно-

артиллерийскими комплексами оснащены танковыми баллистическими вычислителями и другими специальными вычислительными средствами, разработанными под его руководством. В 1972 г. Л.Н. Преснухину присуждена Государственная премия СССР в области науки и техники за исследование и разработку теории проектирования и внедрение в производство специальной аппаратуры, в 1978 г. – Мосинская премия. В отраслевой лаборатории МИЭТ 11 сотрудников стали лауреатами Государственной премии, 4 – лауреатами Мосинской премии, 70 – награждены орденами и медалями.

Л.Н. Преснухин вел большую общественную работу будучи депутатом Зеленоградского горсовета (1967), депутатом Моссовета (1978, 1982, 1985), членом Совета Главных конструкторов Миноборонпрома по специальным комплексам управления, председателем комиссии по премиям Совета Министров СССР в области вычислительной техники, членом экспертных комиссий и пленумов ВАК при СМ СССР, членом президиума Комитета по Ленинским и Государственным премиям, председателем ряда диссертационных советов.

За заслуги в создании специальной техники, а также в деле подготовки высококвалифицированных специалистов

в области электроники Указом Президиума Верховного Совета СССР от 11 марта 1984 г. Московский институт электронной техники под руководством Преснухина Л.Н. награжден орденом Трудового Красного Знамени.

За заслуги в подготовке инженерных и научных кадров и создание вычислительных средств и систем управления для специальной техники Л.Н. Преснухин награжден орденами Ленина (1984), Октябрьской Революции (1978), двумя орденами Трудового Красного Знамени (1961, 1971), многими медалями.

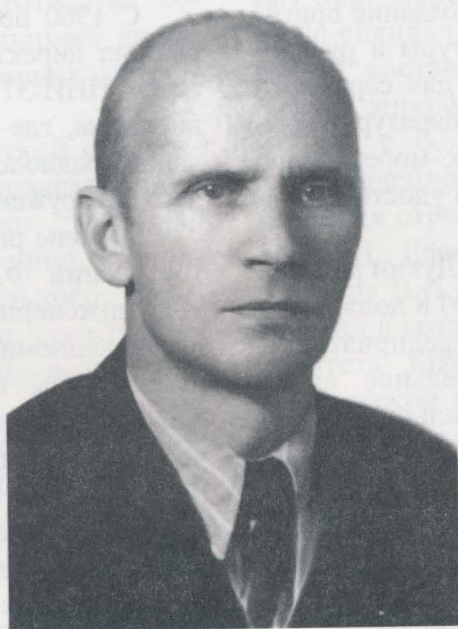
С 1988 по 2007 г. Леонид Николаевич продолжал трудиться в МИЭТ в должностях научного руководителя отраслевой лаборатории вычислительных средств и систем управления и советника ректората.

Леонид Николаевич Преснухин ушел из жизни 27 июня 2007 г. и похоронен на Зеленоградском кладбище.

Добрая и светлая память о Леониде Николаевиче Преснухине – первом ректоре Московского института электронной техники и основателе уникального учебно-научно-производственного комплекса для подготовки высококвалифицированных специалистов в области микроэлектроники и вычислительной техники – выдающемся ученом, талантливом конструкторе, блестящем педагоге и воспитателе, требовательном и умелом организаторе мы навсегда сохраним в наших сердцах.

*Редколлегия*

## К 100-летию со дня рождения Лукина Федора Викторовича



(1908 – 1971)

*Основатель Центра микроэлектроники в г. Зеленограде,  
доктор технических наук, профессор, лауреат Ленинской и  
Государственных премий СССР*

Лукин Федор Викторович родился 25 июля 1908 г. в местечке Глуск Минской губернии в семье государственных служащих.

Детские и юношеские годы Федора Лукина совпали по времени с разрушительными событиями Первой мировой и Гражданской войн, польской интервенции, происходивших на территории Минской губернии. Из-за материальных трудностей семьи ему удалось получить только начальное четырехклассное образование. Далее последовали годы упорной самоучебы и тяжелого физического труда. С 1925 по 1929 г. Федор Лукин работал в г. Бобруйске, где в 1927 г. сдал квалификационный экзамен на право обслуживания машин тепловой электростанции.

В 1929 г. Ф.В. Лукин поступил на электротехнический факультет Московского высшего технического училища им. Н.Э. Баумана. В 1930 г. на базе этого факультета был образован новый вуз – Московский энергетический институт (МЭИ), который Федор Викторович окончил в 1934 г., получив диплом инженера-электрика по специальности «Радиотехника».

С 1935 по 1953 г. Ф.В. Лукин работал в НИИ-10 Минсудпрома (ныне ГНПО «Альтаир») на должностях от старшего инженера-разработчика радиоэлектронных устройств до главного инженера предприятия. Федор Викторович разрабатывал новые системы вооружения для Военно-морского флота; в 1945 г. защитил кандидатскую диссертацию. За создание



радиолокационных систем «Редан 1» и «Редан 2» управления стрельбой артиллерии главного и малого калибра крейсеров и эсминцев ему была присуждена Сталинская премия. В 1953 г. за создание оригинальной стендовой аппаратуры и руководство доработкой проекта для серийного производства бортовой аппаратуры крылатой ракеты класса «воздух–море» Федор Викторович был второй раз удостоен Сталинской премии.

С 1953 по 1960 г. Ф.В. Лукин работал в КБ-1 (ныне НПО «Алмаз») в должности заместителя начальника предприятия – главного инженера. Длительное время исполнял обязанности начальника КБ-1. Активно участвовал в работах по постановке на боевое дежурство противосамолетной системы ПВО Москвы С-25 и созданию ракетных систем различных классов.

В КБ-1 под руководством и при непосредственном участии Ф.В. Лукина в предельно сжатые сроки была проведена большая работа по перестройке всех производственных и технологических циклов, что позволило предприятию стать лидером по технологическим процессам изготовления уникальной радиоэлектронной аппаратуры.

За создание и внедрение в серийное производство мобильной зенитно-ракетной системы С-75 в 1958 г. Ф.В. Лукину присвоено звание лауреата Ленинской премии. В 1959 г. Федор Викторович стал доктором технических наук.

Неоценима роль Ф.В. Лукина на начальном этапе работ по созданию отечественной системы противоракетной обороны (ПРО) А-35. Уже в 1953 г. он предложил срочно приступить к работам по данной тематике.

Ф.В. Лукин в числе первых среди руководителей отраслевого масштаба пришел к пониманию того, что электронная аппаратура на основе дискретных элементов исчерпала свои возможности. В 1960 г. в КБ-1 создается первая в стране лаборато-

рия микроэлектроники, привлекавшая к своей работе в качестве контрагентов многие коллективы НИИ и КБ, учебных и академических институтов страны.

С 1960 по 1963 г. Федор Викторович работал директором – научным руководителем НИИ-37 (ныне НИИ ДАР) Минрадиопрома, где занимался проблемами создания радиолокационных станций дальнего обнаружения для систем ПВО и ПРО.

За годы работы в оборонном аппарате Ф.В. Лукин накопил огромный инженерно-технический, научный и организационный потенциал. Непосредственно участвуя в создании различных сложных систем оборонной техники в качестве специалиста-разработчика, главного конструктора разработок или руководителя предприятия, Ф.В. Лукин предложил и реализовал на практике немало новаторских концептуальных, научных, инженерных и технологических идей. К его мнению прислушивались в руководстве страны. Поэтому, когда встал вопрос о создании в СССР специализированного Центра микроэлектроники и назначении его руководителя, кандидатура Ф.В. Лукина оказалась вне конкуренции.

Постановлением Совета Министров СССР от 29 января 1963 г. за № 124 Ф.В. Лукин был назначен заместителем Председателя Государственного Комитета при СМ СССР по электронной технике (ГК ЭТ, позже Минэлектронпром), а приказом Председателя ГК ЭТ А.И. Шокина № 17-к от 8 февраля 1963 г. Федора Викторовича назначили директором создаваемого Центра микроэлектроники в г. Зеленограде.

На начальном этапе Федор Викторович сосредотачивается на подборе научных и руководящих кадров, формировании научно-производственных коллективов и промышленном строительстве. Ему приходится принимать непосредственное участие в работе архитектурно-планировочных и строительных организаций, вносить изменения в проекты,

иногда расчетами доказывать обоснованность своих решений. Он напрямую участвует в формировании тематики создаваемых предприятий, вникает в проводимые разработки, оказывает оперативную помощь в их реализации. Принимает активное участие в разработках первых отечественных интегральных схем.

За сравнительно короткий срок руководства Центром микроэлектроники (1963–1970) Ф.В. Лукин проделал огромную работу по созданию, становлению и развитию уникального, принципиально нового научно-производственного комплекса, включающего 9 научно-исследовательских организаций, 5 опытных заводов, уникальный специализированный вуз – Московский институт электронной техники (МИЭТ), необходимые объекты инфраструктурного обеспечения.

По состоянию на 1 июня 1970 г. в институтах и КБ Центра микроэлектроники работали 12924 человек, в том числе 9 докторов и 214 кандидатов наук; численность работающих на заводах составляла 16154 человек. Для размещения предприятий Центра было построено 240 тыс. кв. м производственных площадей. Федор Викторович в кратчайший срок выполнил огромный объем работ по набору и расстановке ярких и талантливых личностей – руководителей НИИ, КБ и заводов, в числе которых И.Н. Букреев, К.А. Валиев, А.Ю. Малинин, В.В. Савин, Г.Я. Гуськов, В.С. Сергеев, В.И. Стафеев, Д.И. Юдицкий, Б.В. Тарабрин и многие другие.

За достигнутые успехи в деле создания отечественной микроэлектроники Указом Президиума Верховного Совета СССР от 18.01.1971 г. Центр микроэлектроники под руководством Ф.В. Лукина награжден орденом Ленина.

Федор Викторович вел большую научную и педагогическую работу, преподавал

давал в МЭИ и МЭИС – Московском электротехническом институте связи, где читал лекционные курсы «Измерения» и «Радиоприемные устройства». В 1966 г. ему присвоено ученое звание профессора по специальности «Микроэлектроника». В составе коллектива работников Центра микроэлектроники – известных ученых с большим опытом работы в промышленности и высших учебных заведениях страны (Высокий Б.Ф., Юдицкий Д.И., Ефимов И.Е., Акушский И.Я., Филатов В.Н.) Ф.В. Лукин активно участвовал в создании самого крупного факультета МИЭТ – микроприборов и технической кибернетики (МП и ТК) в составе кафедр вычислительной техники, вычислительной математики, схемотехники, микроэлектроники, электротехники, радиоэлектроники, высшей математики.

Выдающиеся заслуги Ф.В. Лукина отмечены высокими государственными наградами: орденами Ленина (1955, 1958), Трудового Красного Знамени (1958), «Знак Почета» (1945, 1950), многими медалями.

Большая напряженная работа сказалась на здоровье Федора Викторовича – 18 июля 1971 г. смерть оборвала жизнь крупного ученого, педагога, организатора науки и производства оборонной промышленности, радиоэлектроники и микроэлектроники.

Указом Президиума Верховного Совета РСФСР от 18 мая 1983 г. Научно-исследовательскому институту физических проблем (НИИФП) присвоено имя Ф.В. Лукина.

Зеленоградцы всегда будут помнить об огромном вкладе Федора Викторовича Лукина в создание первого Центра отечественной микроэлектроники, способствовавшего дальнейшему научно-техническому прогрессу нашей страны.

*Редколлегия*



## Памяти Курова Грациана Александровича



(1926 – 2008)

17 апреля 2008 г. ушел из жизни доктор технических наук, профессор, ученый в области физики и технологии тонких пленок, технологии интегральных схем Куров Грациан Александрович.

В 1949 г. Грациан Александрович окончил инженерно-физический факультет МИФИ и поступил в аспирантуру, в 1953 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. С 1954 по 1968 г. работал в Институте кристаллофизики АН СССР в должности младшего, а затем старшего научного сотрудника. В 1967 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

С января 1968 г. Куров Г. А. – профессор Московского института электронной техники. С именем Курова Г. А. связано создание, становление и развитие выпускающей кафедры гибридных интегральных схем (ГИС) на физико-техническом факультете МИЭТ, которой он руководил с ноября 1968 по сентябрь 1982 г. Под его руководством на кафедре ГИС было создано научное направление по исследованию макроскопических

дефектов в тонких пленках и защищено 7 кандидатских диссертаций. Научные работы по исследованию фликкерного шума в металлических пленках и контактах, выполненные студентами и аспирантами кафедры ГИС в 70-х – начале 80-х гг, получили широкую известность и остаются актуальными до настоящего времени.

После упразднения кафедры ГИС, в связи с реорганизацией МИЭТ, Куров Г. А. перешел на кафедру микроэлектроники, где проработал в должности профессора до сентября 1985 г. С 1985 по 1994 г. Куров Г. А. работал в Авиационно-технологическом институте в должности профессора кафедры технологии производства радиоэлектронной аппаратуры, а затем – кафедры электроники и информатики.

Куров Г. А. – автор более 100 научных трудов, 5 учебных пособий, 7 авторских свидетельств на изобретения.

Преподаватели и сотрудники бывшей кафедры ГИС сохранили самые теплые воспоминания о Грациане Александровиче – справедливом и принципиальном человеке, о доброжелательной и творческой атмосфере, царившей на кафедре.

*Редколлегия*

# CONTENTS

## Electronic engineering materials

<i>E.N.Vigdorovich, Ju.N.Sveshnikov</i> Production of Quantum-Sized Heterostructures Based on GaN.....	3
--	---

## Microelectronic devices and systems

<i>E.A.Ignatjeva, V.V.Uzdovskii, V.I.Khainovskii</i> Photoelectrical Processes of Five-Diode Vertical Integrated Spectrum-Selective Photocell.....	10
<i>V.V.Losev</i> Injected Photodiodes Based on Low-Resistance ZnS Crystals.....	17
<i>A.V.Malcev</i> Peculiarities of Movement of Charged Particles in HF Field at Amplitude Modulation of Source Voltage of Mass Quadrupole Filter .....	22

## Circuit engineering and design

<i>D.V.Boulakh</i> Application of Compilation Approach to Analog Circuits Simulation .....	26
<i>T.Y.Krupkina, V.V.Losev, N.N.Muhanuk, M.G.Putrya</i> Automation of Standard Cell Libraries Development Based on Cadence Parameterized Cells.....	31

## Integrated radioelectronic devices

<i>V.I.Oreshkin, K.S.Lyalin, J.V.Chikounova</i> Peculiarities of Designing Digital Antenna Arrays .....	36
<i>V.D.Sadkov, B.N.Utkin</i> Development of Chip Attenuator for Surface Assembling Based on Resistive Structures .....	42

## Measurement methods and technology

<i>S.K.Maksimov</i> Peculiarities, Methods and Advantages of Integral Method for Investigation of Nanosized Crystallite Textures in Electron Microscopy. II. Method Practical Implementation .....	47
<i>V.D.Verner, G.N.Gaidukov, P.S.Pagin</i> Investigation of Surface Modification Influence on Frequency Properties of Micro Resonator .....	55
<i>I.N.Burdinsky</i> Application of Programmable Array Logic for Correlation Processing of Noise-Like Hydro-Acoustic Signals.....	62

## Brief reports

<i>L.P.Milseshko</i> Influence of Mode of Silicon Anode Oxide Films Formation under Galvanostatic Condition on Phosphor Content in Them .....	68
<i>V.N.Biryukov</i> A four-parameter static mathematical model of a field-effect transistor, continuous with all its derivatives, has been proposed. The specific feature of the model is the application of physical parameters effectively determined by the least-squares method.....	69
<i>E.V.Bathirev, Htein LinOo</i> Lobe Sensor For Angular Coordinates of Solar Energy Installation .....	72
<i>A.V.Gureev, S.E.Voronin</i> Gaussian Pulse Generator for Ultra-Wide Band Transcievers.....	74
<i>V.M.Troyanovsky</i> Computer Simulation of Identification Procedures for Dynamic Objects .....	76
<i>A.L.Ezdakov</i> Object-Oriented Diagnostic Expert System «MALEX» .....	78

## Conferences. Exhibitions

<i>V.D.Verner, A.A.Reznev, A.N.Saurov</i> Choice of Tactics and Strategy of Electronic Devices Production.....	80
--	----

# ABSTRACTS

## ELECTRONIC ENGINEERING MATERIALS

### Production of Quantum-Sized Heterostructures Based on GaN

*E.N.Vigdorovich, Ju.N.Sveshnikov*

A two-step MOCVD-hydride method of fabricating GaN layers has been investigated. Some issues of doping the layers by donor and acceptor impurities have been studied. The laws of the influence of technological modes on the growth rate, structure and the functional characteristics of the quantum-sized heterostructures based on GaN with multiple quantum wells have been determined.

## MICROELECTRONIC DEVICES AND SYSTEMS

### Photoelectrical Processes of Five-Diode Vertical Integrated Spectrum-Selective Photocell

*V.I.Khainovskii, E.A.Ignatjeva, V.V.Uzdovskii*

The distributions of the electrical potential in the bulk of the five-diode vertically integrated photo-receiving structure have been studied. The spectral photosensitivities of five regions of the conductivity different types have been obtained. The photo relaxation times for the above mentioned regions have been found.

### Injected Photodiodes Based on Low-Resistance ZnS Crystals

*V.V.Losev*

The results of the experimental investigation of Ni-n-n<sup>+</sup>-In fabricated from the low-resistance ZnS:Al (n<sup>+</sup>-area) have been presented. A compensated high-resistance n-layer was obtained by thermodiffusion of Ag. The photodiodes have the injecting amplification of photo current at 1-10V direct biases. The peculiarities of the dependence of current across diodes on the thickness of n-layer in darkness and in UV-light have been revealed. The photosensitivity has the maximum in the narrow spectral range near the fundamental absorption.

### Peculiarities of Movement of Charged Particles in HF Field at Amplitude Modulation of Source Voltage of Mass Quadrupole Filter

*A.V.Malcev*

Some features of the ions movement in a quadrupole field at the amplitude modulation of the source voltage applied to the opposite electrodes of the mass filter have been considered. The influence of amplitude modulation depth and the modulation frequency value on the diagram of stability and movement of ions and the mass-analyzer resolution has been investigated.

## CIRCUIT ENGINEERING AND DESIGN

### Application of Compilation Approach to Analog Circuits Simulation

*D.V.Boulakh*

A new way of the analog circuit simulation software construction has been described. The time comparison between the traditional SPICE-like simulator and the compilation one has been executed.

### Automation of Standard Cell Libraries Development Based on Cadence Parameterized Cells

*T.Y.Krupkina, V.V.Losev, N.N.Muhanuk, M.G.Putrya*

The trends in development of the scientific-educational programs in designing microelectronic devices have been considered, and the significance of involving students and PhD. post-graduates in scientific projects has been underlined. The problems of the standard cell libraries development have been investigated, the automation approaches based on the parametric cells and the application of the optimization methods have been proposed. The prototype of the inverter standard cell, created in accordance with the above theoretical basis, has been presented.

## INTEGRATED RADIOELECTRONIC DEVICES

### Peculiarities of Designing Digital Antenna Arrays

*V.I.Oreshkin, K.S.Lyalin, J.V.Chikounova*

Some problems arising in designing digital antenna array (or Smart Antenna) have been considered. The results of study on the influence of DAC (digital-to-analog converter) parameters on the system characteristics have been presented, the modeling for the purpose to find out the influence of gas-phase scattering on the set forth antenna beam pattern has been performed.

### Development of Chip Attenuator for Surface Assembling Based on Resistive Structures

*V.D.Sadkov, B.N.Utkin*

The topology of the chip attenuators and adapt-attenuators of attenuation broad range for surface assembling, based on the distributed resistive structures, has been proposed, and their calculation has been executed. The results of the calculations and of the experimental studies both on real samples of the developed items and on their large-scale models have been presented.

## MEASUREMENT METHODS AND TECHNOLOGY

### Peculiarities, Methods and Advantages of Integral Method for Investigation of Nanosized Crystallite Textures in Electron Microscopy. II. Method Practical Implementation

*S.K.Maksimov*

The advantages of realization of the textures electron-graphic studies (EDST) within the framework of the electron-microscopy studies (EMS), turning it, essentially, to a new method with unique locality, self-descriptiveness and resolution, have been noted. It is distinguished by the precision control of projection axes, permits to combine in the same experiment and for the same volume the electron-graphic and electron-microscopy studies, to select the volumes to be investigated based not only on the peculiarities of EMS patterns, but, also, on EDTS, etc. It has been indicated that the experimenter, relying on the laws and proposed methods, is able to develop the options of the investigations responding to the object being studied and to his own skills.

### Investigation of Surface Modification Influence on Frequency Properties of Micro Resonator

*V.D.Verner, G.N.Gaidukov, P.S.Pagin*

The influence of hetero-layer on the elastic constants and surface tension in nanoelectric-mechanical systems has been considered. The quantitative comparison of these effects on an example of a silicon resonator has been performed. It has been shown that the presented results are within the range of possible experimental observation.

### Application of Programmable Array Logic for Correlation Processing of Noise-Like Hydro-Acoustic Signals

*I.N.Burdinsky*

A measurement board based on the FPGA technology, that allows the highly accurate real-time processing of hydro-acoustic navigational and control signals, has been designed. The results of the experiments in a real-life environment have been presented.

## BRIEF REPORTS

### Influence of Mode of Silicon Anode Oxide Films Formation under Galvanostatic Condition on Phosphor Content in Them

*L.P.Milseshko*

It has been found that while anodizing silicon of p-type in 1.5 M  $H_3PO_4$  solution in ethylene glycol with addition of 1 M  $H_2O$  at constant current density  $5mA/cm^2$ , the quantity of the introduced phosphor into anode oxide films (AOF) is proportional to the forming voltage value. Moreover, the dependence of the Np phosphor concentration in AOF on the U $\phi$  formation voltage in the range

of 74 – 288 V is approximated by the expression  $N_p = 1.4 \cdot 10^{18} U_{\phi} - 2.5 \cdot 10^{18}$  with the correlation coefficient equal to 0.982. An assumption about the  $PO_4^{3-}$  concentration increase in the AOF gel-layer according to the anode potential value has been made.

#### **$C_{\infty}$ -Continuous Four-Parameters Compact Model of Field-Effect Transistor**

*V.N.Biryukov*

A four-parameter static mathematical model of a field-effect transistor, continuous with all its derivatives, has been proposed. The specific feature of the model is the application of physical parameters effectively determined by the least-squares method.

#### **Lobe Sensor For Angular Coordinates of Solar Energy Installation**

*E.V.Bathirev, Htein Lin Oo*

The principles of constructing the goniometric tracking solar energy installation, consisting of the antenna system, have been presented. The gonimetric sensor measures a spatial error between the axis and the direction at the object (the Sun). The principle of forming the lobe direction-finding characteristic of the antenna system and the possibility of precise tracking the Sun using the extrapolation of angular position of the Sun and the drive have been demonstrated.

#### **Gaussian Pulse Generator for Ultra-Wide Band Transcievers**

*A.V.Gureev, S.E.Voronin*

A new circuit of the Gaussian pulse formation, which allows obtaining a signal of not less than 200 ps duration, has been presented.

#### **Computer Simulation of Identification Procedures for Dynamic Objects**

*V.M.Troyanovsky*

The problems of identification of the dynamic objects weight function and verification of the algorithms created for solving the problem have been considered.

The program tools and modeling results have been described.

#### **Object-Oriented Diagnostic Expert System «MALEX»**

*A.L.Ezdakov*

The peculiarities of the structure and the specifics of using the object-oriented expert system MALEX have been considered. The main distinctions of these systems from the standard expert ones have been presented.

### **CONFERENCES. EXHIBITIONS.**

#### **Choice of Tactics and Strategy of Electronic Devices Production**

*V.D.Verner, A.A.Reznev, A.N.Saurov*

The analysis of the exhibition «Productronika – 2007» exposition, that is one of the leading exhibitions of the technological equipment for production of electronic technology items, has been performed.