

## Дорогой читатель!

Праздник Нового года всегда связан с желанием объединить две противоположности: сохранить и изменить. Этот конфликт мирно разрешает надежда, что все хорошее останется и умножится, а плохое, если и не исчезнет, то заметно уменьшится. К хорошему можно отнести увеличение числа авторов статей нашего журнала и рост профессионального уровня их публикаций, к плохому - немногочисленные коллизии из-за различия мнений авторов, рецензентов и редколлегии по содержанию предлагаемых статей.

И абсолютно новое в грядущем 2008 году - появление англоязычной версии части статей наших авторов в виде дополнительного номера журнала «Физика и техника полупроводников». Ориентация на тематику этого журнала несколько сужает спектр публикаций, характерный для нас. С другой стороны, это позволяет расширить круг читателей за счет наших зарубежных коллег.

2008 год в России объявлен Годом семьи. Редколлегия и редакция желают Вам и Вашим близким крепкого здоровья, успехов, удачи и взаимопонимания во всех Ваших совместных делах.

Со своей стороны мы будем своевременно информировать Вас и Ваших коллег о новых актуальных результатах научно-педагогической деятельности вузов и НИИ России в области электроники.

Главный редактор  
доктор физ.-мат. наук,  
профессор



В.Д. Вернер



# Известия высших учебных заведений

## ЭЛЕКТРОНИКА 1'2008



*Научно-технический журнал*

*Издается с 1996 г.*

*Выходит 6 раз в год*

### СОДЕРЖАНИЕ

#### Фундаментальные исследования

- Лавров И.В.* Теория электропроводности неоднородных материалов с текстурой ..... 3

#### Материалы электронной техники

- Яременко Н.Г., Карачевцева М.В., Страхов В.А., Галиев Г.Б., Мокеров В.Г.* Фотолюминесценция эпитаксиальных слоев GaAs, легированных кремнием ..... 10

- Аль-Хадрами И.С., Королев А.Н., Семенистая Т.В., Назарова Т.Н., Петров В.В.* Исследование газочувствительных свойств медьсодержащего полиакрилонитрила ..... 20

#### Микроэлектронные приборы и системы

- Тимошенко В.П., Братов В.А.* Преобразователь кодов NRZ в NRZM на арсенидгаллиевых гетеропереходных биполярных транзисторах ..... 26

- Игнатьева Е.А., Уздовский В.В., Хайновский В.И.* Расчет конструктивных параметров и электрического потенциала трехдиодной вертикально интегрированной спектрально-селективной фотоячейки ..... 35

- Гуминов Н.В., Старосельский В.И.* Прецизионный истоковый повторитель с малым входным током на полевых транзисторах с управляющим барьерным контактом ..... 43

#### Учредители:

Министерство  
образования и науки  
Российской Федерации

Московский  
государственный институт  
электронной техники  
(технический университет)

Главный редактор  
*В.Д.Вернер*

#### Редакционная коллегия:

*Бархоткин В.А.*  
*Быков Д.В.*  
*Грибов Б.Г.*  
*Казённых Г.Г.*  
*Коноплёв Б.Г.*  
*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.miet.ru  
<http://www.miet.ru>

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



<i>Максимов С.К., Максимов К.С.</i> Проблемы текстурированности в нанотехнологии. Контроль текстур .....	49
--	----

### Схемотехника и проектирование

<i>Кремлев В.Я., Крупкина Т.Ю., Николаев А.В.</i> Построение цифровых схем на основе элементов конденсаторно-транзисторного типа .....	56
--	----

### Информационные технологии

<i>Четверик В.Н.</i> Дифференциальный радиоконтраст в задачах оценки качества радиолокационных изображений .....	62
--	----

<i>Переверзев А.Л.</i> Аппаратная реализация одномерного медианного фильтра с модульной архитектурой .....	68
--	----

### Методы и техника измерений

<i>Филатов А.Л., Луговской А.В.</i> Использование фото-рефрактивного эффекта для комплексного трехмерного локального измерения электрофизических и термических параметров кремниевых структур .....	74
---	----

<i>Хаханина Т.И., Гурская А.А.</i> Применение инверсионной вольтамперометрии для контроля содержания микропримесей в синтетическом сапфире .....	79
--	----

### Краткие сообщения

<i>Гулидов Д.Н., Бородин Е.В., Селезнев К.А., Изченко В.Н.</i> Функционально-итерационное проектирование СМК, соответствующей ГОСТ Р ИСО 9001:2001 .....	84
--	----

<i>Уткин В.Н., Садков В.Д., Якимов Д.Ю.</i> Расчет Т-образных поглощающих элементов чип-аттенюаторов для поверхностного монтажа .....	86
---	----

### Юбилей

Копаеву Юрию Васильевичу — 70 лет .....	89
Бархоткину Вячеславу Александровичу — 70 лет .....	91
95 лет со дня рождения Курбатова Леонида Николаевича .....	93

### Конференции. Семинары

15-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика - 2008» .....	4 стр.обложки
---	---------------

II Московская межвузовская научно-практическая конференция «Студенческая наука» .....	25
---	----

Contents .....	95
Abstracts .....	96
К сведению авторов .....	99

Заведующая редакцией  
*С.Г.Зверева*

Редактор  
*А.В.Тихонова*

Научный редактор  
*С.Г.Зверева*

Художественный редактор  
*А.В.Тихонова*

Корректор  
*Л.Ф.Летунова*

Технический редактор  
*Л.Г.Лосякова*

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

Подписано в печать 07.02.08  
Формат бумаги 60х84 1/8.  
Печать офсетная.  
Объем 11,63 усл.печ.л.,  
11,4 уч.-изд.л.  
Заказ № 11.

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.



# ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 621.315.5:537.311/312

## Теория электропроводности неоднородных материалов с текстурой

*И.В.Лавров*

Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)

Развита теория электропроводности неоднородных сред с текстурой. Используя подход эффективной среды, найдены компоненты тензора электропроводности поликристаллической среды как функции значений компонент тензора электропроводности кристаллитов, степени упорядоченности ориентаций кристаллитов и ориентации образца в лабораторной системе координат. Даются рекомендации по экспериментальному определению основных характеристик образца (в том числе величины статистического разброса направлений осей кристаллитов относительно оси текстуры).

Неоднородные материалы, к которым относятся композиционные материалы (в том числе и нанокompозиты) и поликристаллические соединения, имеют важное значение в электронике [1]. Электрические и оптические свойства таких материалов уже почти полтора столетия привлекают внимание исследователей, первыми были еще Максвелл, Рэлей и Бруггеман. Обзоры классических работ, в которых впервые были предложены основные варианты подхода эффективной среды, приведены в [2, 3]. Объединение и обобщение этих вариантов дано в работе Страуда [4], в которой автор детально рассмотрел проблему электропроводности в неоднородных средах. Подход эффективной среды, развитый в [4], применим к разнообразным неоднородным средам, представляющим собой конгломераты гранул (кристаллитов) со статистически различными объемами (однако намного превышающими атомный объем), формами и ориентациями; в общем случае кристаллиты могут различаться и химическим составом.

До настоящего времени в многочисленных работах, посвященных проблеме электропроводности неоднородных материалов, рассматривались среды, состоящие из однородных изотропных компонентов: матрицы и включений различной формы, регулярно или случайно распределенных по объему, ориентированных в одном направлении или имеющих равномерное распределение ориентаций; слоистые среды с регулярной или случайной структурой; а также поликристаллические среды без текстуры, т.е. имеющие равномерное распределение ориентаций кристаллитов [4]. Исчерпывающий обзор этих исследований можно найти в [5, 6].

В настоящей работе рассматривается случайная поликристаллическая среда с текстурой, т.е. при наличии некой преимущественной ориентации кристаллитов, определяемой осью текстуры. Цель работы – расчет тензора эффективной электропроводности и анализ его зависимостей от параметров кристаллитов и от распределения их ориентаций; кристаллиты считаются эллипсоидальными и одноосными, одного типа (с точки



зрения электропроводности), причем окончательное вычисление проводится для сферических кристаллитов. Задача решается при помощи одной из модификаций подхода эффективной среды [4] – метода самосогласованного решения (по терминологии, принятой в [5]). При этом, как и в [4], предполагается, что контакты кристаллитов имеют омический характер.

Рассмотрим образец неоднородной проводящей среды объема  $V$ , помещенный во внешнее однородное электрическое поле  $\mathbf{E}_0$ . Тогда тензор эффективной электропроводности  $\sigma_e$  среды определяется уравнением  $\langle \mathbf{J} \rangle = \sigma_e \langle \mathbf{E} \rangle$ , где  $\mathbf{J}$  – плотность тока,  $\langle \mathbf{E} \rangle = \mathbf{E}_0$ . Представляя тензор  $\sigma(\mathbf{x})$  электропроводности среды в точке  $\mathbf{x}$  в виде  $\sigma(\mathbf{x}) = \sigma_e + \delta\sigma(\mathbf{x})$ , от уравнений электростатики  $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$ ,  $\nabla \times \mathbf{E} = 0$  с учетом того, что  $\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \sigma(\mathbf{x})\mathbf{E}(\mathbf{x})$ , приходим к краевой задаче для определения электростатического потенциала  $\Phi(\mathbf{x})$ :

$$\begin{cases} \nabla \cdot \sigma_e \nabla \Phi(\mathbf{x}) = -\nabla \cdot \delta\sigma \nabla \Phi(\mathbf{x}), & \mathbf{x} \in V, \\ \Phi(\mathbf{x}) = \Phi_0(\mathbf{x}) \equiv -\mathbf{E}_0 \cdot \mathbf{x}, & \mathbf{x} \in S, \end{cases}$$

где  $S$  – поверхность, ограничивающая объем  $V$ . С введением функции Грина  $G(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$  посредством условий

$$\begin{cases} \nabla \cdot \sigma_e \nabla G(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = -\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}'), & \mathbf{x}, \mathbf{x}' \in V; \\ G(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = 0, & \mathbf{x}' \in S, \end{cases}$$

$\Phi(\mathbf{x})$  может быть представлен в виде:  $\Phi(\mathbf{x}) = \Phi_0(\mathbf{x}) + \iiint_V G(\mathbf{x}, \mathbf{x}') \nabla' \cdot \delta\sigma(\mathbf{x}') \nabla \Phi(\mathbf{x}') d^3 \mathbf{x}'$ .

Если кристаллиты имеют форму эллипсоидов, то, как показано в [4], определяя тензор  $\Gamma \equiv \Gamma_i$ , связанный с  $i$ -м кристаллитом, равенством

$$\Gamma_i^{kl} = -\iiint_{S'_i} \frac{\partial}{\partial x_k} G(\mathbf{x}, \mathbf{x}') \cdot n'_l d^2 \mathbf{x}', \quad (1)$$

где  $S'_i$  – поверхность  $i$ -го кристаллита,  $\mathbf{n}'$  – внешняя нормаль к  $S'_i$ , получим уравнение для нахождения тензора  $\sigma_e$ :

$$\langle (\mathbf{I} - (\sigma - \sigma_e)\Gamma)^{-1} (\sigma - \sigma_e) \rangle = 0. \quad (2)$$

Усреднение в (2) проводится по ориентациям кристаллитов в координатной системе  $xyz$ , связанной с осью текстуры. Ось  $z$  направляется по оси текстуры, а оси  $x$  и  $y$  перпендикулярны последней и друг другу, в остальном их направления произвольны. Также в расчете используются еще две координатных системы: лабораторная  $XYZ$  и система  $\xi\eta\zeta$ , связанная с кристаллитом. Ось  $\zeta$  направлена по оси кристаллита; направления  $\xi$  и  $\eta$  выбираются произвольно при условии их перпендикулярности оси  $\zeta$  и друг другу. Ориентацию  $\xi\eta\zeta$  относительно  $xyz$  (матрицу поворота от  $xyz$  к  $\xi\eta\zeta$ ) обозначим как  $\mathbf{g}'(\psi', \vartheta', \varphi')$ , где  $\psi', \vartheta', \varphi'$  – углы Эйлера. Ориентацию  $xyz$  относительно  $XYZ$  обозначим через  $\mathbf{G}(\Phi_0, \Theta_0, \Psi_0)$ .

Распределение ориентаций кристаллитов считается симметричным относительно оси текстуры, т.е. принимается в форме



$$\tilde{f}(\psi', \vartheta', \varphi') = \frac{1}{4\pi^2} f(\vartheta'), \quad 0 \leq \psi' < 2\pi, \quad 0 \leq \vartheta' \leq \frac{\pi}{2}, \quad 0 \leq \varphi' < 2\pi, \quad (3)$$

где  $f(\vartheta')$  – плотность распределения углов  $\vartheta'$  между осью текстуры и осями кристаллитов.

Пусть  $\sigma''$ ,  $\sigma'$  – матрицы тензора электропроводности кристаллита в системах  $\xi\eta\zeta$  и  $xуz$  соответственно, тогда

$$\sigma'' = \sigma_0 \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha \end{vmatrix}, \quad (4)$$

$$\sigma' = \sigma_0 \begin{vmatrix} 1 + (\alpha - 1)\sin^2 \vartheta' \sin^2 \psi' & (1 - \alpha)\sin^2 \vartheta' \sin \psi' \cos \psi' & (\alpha - 1)\sin \vartheta' \cos \vartheta' \sin \psi' \\ (1 - \alpha)\sin^2 \vartheta' \sin \psi' \cos \psi' & 1 + (\alpha - 1)\sin^2 \vartheta' \cos^2 \psi' & (1 - \alpha)\sin \vartheta' \cos \vartheta' \cos \psi' \\ (\alpha - 1)\sin \vartheta' \cos \vartheta' \sin \psi' & (1 - \alpha)\sin \vartheta' \cos \vartheta' \cos \psi' & 1 + (\alpha - 1)\cos^2 \vartheta' \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Тензор  $\sigma'_e$ , очевидно, имеет вид

$$\sigma'_e = \begin{vmatrix} \sigma_e^{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_e^{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_e^{zz} \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Тензор  $\Gamma$  в системе  $xуz$  также имеет ненулевыми только диагональные компоненты, которые в случае сферических кристаллитов вычисляются по формулам

$$\Gamma^{xx} = \Gamma^{yy} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\sigma_e^{xx} \sigma_e^{zz}} \cdot \varepsilon} (\sqrt{1 - \varepsilon} - \frac{\arcsin \sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\varepsilon}}), \quad \Gamma^{zz} = -\frac{1}{\sigma_e^{zz} \varepsilon} (1 - \sqrt{1 - \varepsilon} \cdot \frac{\arcsin \sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\varepsilon}}), \quad (7a)$$

при  $\varepsilon > 0$ , где  $\varepsilon = 1 - \sigma_e^{xx} / \sigma_e^{zz}$  (этот случай реализуется при  $\alpha > 1$ ) [4];

$$\Gamma^{xx} = \Gamma^{yy} = \frac{\sqrt{\varepsilon^2 - \varepsilon} - \ln(\sqrt{-\varepsilon} + \sqrt{1 - \varepsilon})}{2 \cdot \sqrt{\sigma_e^{xx} \sigma_e^{zz}} \cdot \varepsilon \sqrt{-\varepsilon}}, \quad \Gamma^{zz} = -\frac{1}{\sigma_e^{zz} \varepsilon} (1 - \sqrt{1 - \varepsilon} \cdot \frac{\ln(\sqrt{-\varepsilon} + \sqrt{1 - \varepsilon})}{\sqrt{-\varepsilon}}), \quad (7b)$$

при  $\varepsilon < 0$  ( $\alpha < 1$ ).

Зависимость компонент  $\Gamma^{kl}$  от точки  $\mathbf{x}$  отсутствует, так как при  $V \rightarrow \infty$   $G(\mathbf{x}, \mathbf{x}') \rightarrow G(|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|)$ , и интегралы в (1) не зависят от  $\mathbf{x}$  [4].

Подставляя (5), (6) в (2), получим в результате вычислений систему уравнений:

$$\begin{cases} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{(\alpha - 1)[u_x(v_x - v_z) + \frac{v_z}{2\sigma_0 \Gamma^{xx}}] \cdot \cos^2 \vartheta' + v_z[\frac{\alpha - 1}{2}(u_x + v_x) + u_x v_x]}{(\alpha - 1)(v_x - v_z) \cos^2 \vartheta' + v_z((\alpha - 1) + v_x)} f(\vartheta') d\vartheta' = 0, \\ \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{(\alpha - 1)(v_x - u_z) \cos^2 \vartheta' + u_z((\alpha - 1) + v_x)}{(\alpha - 1)(v_x - v_z) \cos^2 \vartheta' + v_z((\alpha - 1) + v_x)} f(\vartheta') d\vartheta' = 0, \end{cases} \quad (8)$$



где

$$u_x = 1 - \frac{\sigma_e^{xx}}{\sigma_0}, \quad u_z = 1 - \frac{\sigma_e^{zz}}{\sigma_0}, \quad v_x = u_x - \frac{1}{\sigma_0 \Gamma^{xx}}, \quad v_z = u_z - \frac{1}{\sigma_0 \Gamma^{zz}}. \quad (9)$$

Таким образом, задача нахождения тензора проводимости эффективной среды сведена к решению системы уравнений (8) с двумя неизвестными  $\sigma_e^{xx}$  и  $\sigma_e^{zz}$ . Легко убедиться, что система (8) дает решения, совпадающие с результатами, ранее уже полученными в [4] или ожидаемыми из физических соображений, в следующих трех случаях: кристаллиты изотропные с точки зрения электропроводности ( $\alpha = 1$ ); оси всех кристаллитов параллельны оси текстуры ( $f(\vartheta') = \delta(\vartheta')$ ); распределение направлений осей кристаллитов равномерное.

Будем искать аналитические выражения для компонент тензора  $\sigma_e$ . Допустим, что выполняется условие

$$\frac{\sigma^{ij} - (\sigma_e)^{ij}}{\sigma_0} \ll 1, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (10)$$

т.е. компоненты тензора  $\frac{1}{\sigma_0}(\sigma - \sigma_e)$  малы, тогда  $(\mathbf{I} - (\sigma - \sigma_e)\Gamma)^{-1} \approx \mathbf{I} + (\sigma - \sigma_e)\Gamma$  и уравнение (2) принимает вид

$$\langle \sigma - \sigma_e \rangle + \langle (\sigma - \sigma_e)\Gamma(\sigma - \sigma_e) \rangle = 0. \quad (11)$$

Нетрудно проверить, что для недиагональных элементов тензорное уравнение (11) выполняется автоматически, а для элементов  $()^{11}$  и  $()^{22}$  уравнения совпадают, поэтому (11) сводится к системе двух уравнений относительно  $u_x$  и  $u_z$ :

$$\begin{cases} (1 - I_1) + \frac{u_x}{\beta} + \sigma_0 \beta \Gamma^{xx} \left[ 2(1 - 2I_1 + I_2) + 2\gamma(I_1 - I_2) + 2(1 - I_1) \frac{u_x}{\beta} + \left( \frac{u_x}{\beta} \right)^2 \right] = 0, \\ 2I_1 + \frac{u_z}{\beta} + \sigma_0 \beta \Gamma^{xx} \left[ 4(I_1 - I_2) + 4\gamma I_2 + 4\gamma I_1 \frac{u_z}{\beta} + \gamma \left( \frac{u_z}{\beta} \right)^2 \right] = 0, \end{cases} \quad (12)$$

где

$$\gamma = \frac{\Gamma^{zz}}{\Gamma^{xx}}, \quad \beta = \frac{\alpha - 1}{2}, \quad I_1 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 \vartheta' \cdot f(\vartheta') d\vartheta', \quad I_2 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^4 \vartheta' \cdot f(\vartheta') d\vartheta'. \quad (13)$$

Рассмотрим два случая, при которых неравенства (10) выполняются.

1. Если  $|\alpha - 1| \ll 1$ , т.е. кристаллиты слабо анизотропны, тогда  $|u_x| \ll 1$ ,  $|u_z| \ll 1$ ,  $|\varepsilon| \ll 1$ ,  $\Gamma^{xx} \approx \Gamma^{zz} \approx -\frac{1}{3\sigma_0}$ ,  $\gamma \approx 1$ . Подставив эти соотношения в (12), найдем из получившихся уравнений во втором приближении компоненты тензора  $\sigma'_e$ :

$$\begin{cases} \sigma_e^{xx} = \sigma_0 \left[ 1 + \frac{1}{2}(\alpha - 1)(1 - I_1) - \frac{1}{12}(\alpha - 1)^2(1 - I_1^2) \right], \\ \sigma_e^{zz} = \sigma_0 \left[ 1 + (\alpha - 1)I_1 - \frac{1}{3}(\alpha - 1)^2 I_1(1 - I_1) \right]. \end{cases} \quad (14)$$

Как видно из (14), компоненты тензора  $\sigma'_e$  зависят как от параметров, задающих тензоры проводимости отдельных кристаллитов ( $\sigma_0$ ,  $\alpha$ ), так и от распределений их ориентаций, причем в (14) эта зависимость выражена посредством интеграла  $I_1$ . Предположим, что направляющий вектор  $\mathbf{k}'$  главной оси кристаллита имеет нормально распределенные с нулевым математическим ожиданием и дисперсией  $s^2$  координаты Бельтрами  $\mu, \nu$  ( $\mu, \nu$  – координаты точки пересечения линии продолжения вектора  $\mathbf{k}'$  с плоскостью, касательной к единичной полусфере в ее полюсе, см. [7]), т.е.

$$\hat{f}(\mu, \nu) = \frac{1}{2\pi s^2} \exp\left(-\frac{\mu^2 + \nu^2}{2s^2}\right), \quad (15)$$

то для плотности распределения углов  $\vartheta'$  между осью текстуры и осями кристаллитов получим:

$$f(\vartheta') = \frac{1}{s^2} \frac{\operatorname{tg} \vartheta'}{\cos^2 \vartheta'} \exp\left(-\frac{\operatorname{tg}^2 \vartheta'}{2s^2}\right), \quad 0 \leq \vartheta' \leq \frac{\pi}{2}.$$

Тогда

$$I_1 = -\frac{1}{2s^2} \exp\left(-\frac{1}{2s^2}\right) \operatorname{Ei}\left(-\frac{1}{2s^2}\right), \quad (16)$$

где  $\operatorname{Ei}(x) = \int_{-\infty}^x \frac{e^t}{t} dt$  – интегральная экспонента [8].

2. Если распределение ориентаций кристаллитов имеет малый разброс, т.е. дисперсия  $s^2$  мала, тогда  $\sigma_e^{xx} \approx \sigma_0$ ,  $\sigma_e^{zz} \approx \alpha \sigma_0$ ,  $|u_x| \ll 1$ ,  $u_z = 1 - \alpha + \alpha \delta_z$ , где  $\delta_z$  имеет такой же порядок малости, как  $u_x$  и  $s^2$ . При малой дисперсии для вычисления интегралов  $I_1$  и  $I_2$  нормальное распределение можно с хорошей точностью приближать квадратичным с таким же значением дисперсии, поэтому вместо (15) в качестве плотности распределения координат  $\mu, \nu$  можно взять

$$\hat{f}(\mu, \nu) = \begin{cases} \frac{1}{3\pi s^2} \left(1 - \frac{\mu^2 + \nu^2}{6s^2}\right), & \mu^2 + \nu^2 \leq 6s^2, \\ 0, & \mu^2 + \nu^2 > 6s^2. \end{cases}$$

Тогда

$$f(\vartheta') = \begin{cases} \frac{2}{3s^2} \left(1 - \frac{\operatorname{tg}^2 \vartheta'}{6s^2}\right) \frac{\operatorname{tg} \vartheta'}{\cos^2 \vartheta'}, & \vartheta' \in [0; \operatorname{arctg} \sqrt{6}s], \\ 0, & \vartheta' > \operatorname{arctg} \sqrt{6}s, \end{cases}$$



и для интегралов  $I_1$  и  $I_2$  получим:

$$I_1 \approx 1 - 2s^2, \quad I_2 \approx 1 - 4s^2. \quad (17)$$

Линеаризуя уравнения (12) по  $u_x$  и  $\delta_z$  и учитывая (17), получаем:

$$\begin{cases} \sigma_e^{xx} = \sigma_0 \left( 1 + \sqrt{\alpha - 1} \cdot \arcsin \sqrt{\frac{\alpha - 1}{\alpha}} s^2 \right) \\ \sigma_e^{zz} = \sigma_0 \left[ \alpha - (\alpha - 1) \left( 1 + \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha - 1}} \cdot \arcsin \sqrt{\frac{\alpha - 1}{\alpha}} s^2 \right) \right] \end{cases}, \quad \text{при } \alpha > 1, \quad (18a)$$

$$\begin{cases} \sigma_e^{xx} = \sigma_0 \left( 1 - \sqrt{1 - \alpha} \cdot \ln \left( \frac{1 + \sqrt{1 - \alpha}}{\sqrt{\alpha}} \right) \cdot s^2 \right) \\ \sigma_e^{zz} = \sigma_0 \left[ \alpha + (1 - \alpha) \left( 1 + \frac{\alpha}{\sqrt{1 - \alpha}} \cdot \ln \left( \frac{1 + \sqrt{1 - \alpha}}{\sqrt{\alpha}} \right) \right) s^2 \right] \end{cases}, \quad \text{при } \alpha < 1. \quad (18b)$$

Найдем матрицу  $\sigma_e$  тензора электропроводности эффективной среды в лаборатор-

ной системе  $XYZ$ . Перепишем  $\sigma'_e$  в виде  $\sigma'_e = \sigma_e^{xx} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_e \end{pmatrix}$ , где  $\alpha_e = \frac{\sigma_e^{zz}}{\sigma_e^{xx}}$ ,

тогда, аналогично (5), получим (обозначив для краткости  $\beta_e = \frac{\alpha_e - 1}{2}$ ):

$$\sigma_e = \sigma_e^{xx} \begin{pmatrix} 1 + 2\beta_e \sin^2 \Theta_0 \sin^2 \Phi_0 & -\beta_e \sin^2 \Theta_0 \sin 2\Phi_0 & \beta_e \sin 2\Theta_0 \sin \Phi_0 \\ -\beta_e \sin^2 \Theta_0 \sin 2\Phi_0 & 1 + 2\beta_e \sin^2 \Theta_0 \cos^2 \Phi_0 & -\beta_e \sin 2\Theta_0 \cos \Phi_0 \\ \beta_e \sin 2\Theta_0 \sin \Phi_0 & -\beta_e \sin 2\Theta_0 \cos \Phi_0 & 1 + 2\beta_e \cos^2 \Theta_0 \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Значения  $\sigma_e^{xx}$  и  $\beta_e$  в первом приближении определяются из следующих выражений.

Для первого случая (кристаллиты слабо анизотропны,  $|\alpha - 1| \ll 1$ ):

$$\sigma_e^{xx} \approx \sigma_0 \left[ 1 + \frac{1}{2}(\alpha - 1)(1 - I_1) \right], \quad \beta_e \approx \frac{\alpha - 1}{4}(3I_1 - 1),$$

где  $I_1$  находится из (16).

Для второго случая (малый разброс ориентаций кристаллитов,  $s^2 \ll 1$ ):

при  $\alpha > 1$ :  $\sigma_e^{xx}$  определяется из (18a),  $\beta_e = \frac{\alpha - 1}{2} \left( 1 - s^2 \left[ 1 + \frac{\alpha + 1}{\sqrt{\alpha - 1}} \arcsin \sqrt{\frac{\alpha - 1}{\alpha}} \right] \right)$ ,

при  $\alpha < 1$ :  $\sigma_e^{xx}$  определяется из (18b),  $\beta_e = \frac{\alpha - 1}{2} \left( 1 - s^2 \left[ 1 + \frac{\alpha + 1}{\sqrt{1 - \alpha}} \ln \left( \frac{1 + \sqrt{1 - \alpha}}{\sqrt{\alpha}} \right) \right] \right)$ .

Выражения (14), (18a), (18б) дают в явном виде решение прямой задачи (в указанных выше специальных случаях): в зависимости от параметров  $\sigma_0$  и  $\alpha$ , характеризующих тензор электропроводности кристаллита, и плотности распределения направлений осей кристаллитов относительно оси текстуры вычисляются компоненты тензора эффективной электропроводности поликристаллической среды с текстурой. Эти же соотношения могут быть использованы и для решения обратной задачи, т.е. оценки параметра  $s^2$ , определяющего величину статистического разброса направлений осей кристаллитов относительно оси текстуры. Согласно (19), тензор  $\sigma_e$  эффективной электропроводности в лабораторной системе является симметричным. Таким образом, выполнив измерения шести компонент тензора  $\sigma_e$ , например  $\sigma_e^{xx}, \sigma_e^{yy}, \sigma_e^{zz}, \sigma_e^{xy}, \sigma_e^{xz}, \sigma_e^{yz}$ , можно найти величины  $\sigma_e^{xx}, \sigma_e^{zz}$ , определяющие тензор эффективной электропроводности в системе, связанной с текстурой, а затем, используя (14), (18a) или (18б), оценить параметр  $s^2$  распределения ориентаций кристаллитов.

Отметим, что система (8), дает решение задачи в общем случае, так как при известной плотности распределения может быть решена с помощью численных методов. Она также может быть использована для получения аналитического решения задачи в некоторых других специальных случаях, например при слабо неравномерном распределении ориентаций кристаллитов.

Рассмотренная в настоящей работе модель может послужить одной из отправных точек для построения теории электропроводности более сложных материалов (нанокомпозитов) и стимулом для более детального экспериментального изучения электрических свойств поликристаллов.

Автор выражает благодарность профессору Иванову Е.Н. за предложенную тему и помощь в работе.

### Литература

1. Нанотехнологии в электронике / Под ред. **Чаплыгина Ю.А.** – М.: Техносфера, 2005. – 448 с.
2. **Борен К., Хафмен Д.** Поглощение и рассеяние света малыми частицами. – М.: Мир, 1986. – 660 с.
3. **Böttcher C.J.F., Bordewijk.** Theory of electric polarization. – Amsterdam – Oxford – N. Y.: Elsevier Scientific Publishing Company, 1978. – Vol. 2. – P. 509.
4. **Stroud D.** Generalized effective-medium approach to the conductivity of an inhomogeneous material // Phys. Rev. B. – 1975. – Vol. 12, N 8. – P. 3368–3373.
5. **Фокин А.Г.** Макроскопическая проводимость случайно-неоднородных сред. Методы расчета // УФН. – 1996. – Т. 166, N 10. – С. 1069–1093.
6. Физика композиционных материалов / Под ред. **Н.Н. Трофимова.** – М.: Мир, 2005. – Т. 2. – 344 с.
7. **Каган В.Ф.** Основы теории поверхностей. – М.–Л.: ОГИЗ, Гостехиздат, 1947. – Т. 1. – 512 с.
8. **Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И.** Интегралы и ряды. Элементарные функции. – М.: Наука, 1981. – 800 с.

Статья поступила  
после доработки  
3 декабря 2007 г.

**Лавров Игорь Викторович** – старший преподаватель кафедры высшей математики № 2 МИЭТ. Область научных интересов: теоретические методы исследования электрических и оптических свойств неоднородной среды.



# МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

УДК 538.958

## Фотолюминесценция эпитаксиальных слоев GaAs, легированных кремнием

*Н.Г.Яременко, М.В.Карачевцева, В.А.Страхов*

Институт радиотехники и электроники РАН (г. Москва)

*Г.Б.Галиев, В.Г.Мокеров*

Институт СВЧ полупроводниковой электроники РАН (г. Москва)

Методом фотолюминесцентной спектроскопии исследовано влияние давления мышьяка на амфотерное поведение кремния в процессе выращивания слоев GaAs, легированных кремнием, с ориентациями (100), (111)А и (111)В. Проведен анализ краевой полосы, определены значения концентрации и степени компенсации в зависимости от давления мышьяка. Исследованы нестехиометрические дефекты в слоях GaAs, выращенных в условиях недостатка и избытка мышьяка, и показано, что природа этих дефектов различна в слоях с ориентацией (111)А и (111)В.

При создании электронных приборов на основе эпитаксиального арсенида галлия для получения слоев *n*-типа традиционно используется кремний. В слоях GaAs с ориентациями ростовой поверхности (100) и (111)В кремний в основном встраивается в подрешетку галлия и устойчиво ведет себя как донорная примесь. В то же время установлено, что при выращивании слоев GaAs, легированных кремнием, на поверхностях (X11)А ( $X = 1, 2, 3$ ) кремний проявляет амфотерные свойства: тип проводимости и концентрация свободных носителей зависят от соотношения парциальных давлений мышьяка и галлия в процессе роста [1–3]. При низких давлениях мышьяка основная часть атомов кремния занимает узлы мышьяка ( $\text{Si}_{\text{As}}$ ), создавая проводимость *p*-типа, с ростом давления мышьяка увеличивается относительная доля атомов кремния в узлах галлия ( $\text{Si}_{\text{Ga}}$ ) и тип проводимости меняется.

Изучение влияния условий выращивания на амфотерное поведение кремния в арсениде галлия, помимо чисто научного интереса, имеет некоторые практические перспективы. Использование одной и той же легирующей примеси для получения *p*- и *n*-областей в одном технологическом процессе дает возможность решать многие технические задачи по созданию новых полупроводниковых приборов на основе GaAs, в частности для получения поперечных *p-n*-переходов.

Целью настоящей работы является исследование влияния парциального давления мышьяка в процессе роста на люминесцентные свойства легированных кремнием слоев GaAs, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках с различной ориентацией. Частично этот вопрос нашел отражение в [1, 2], однако ограниченность экспериментальных данных в этих работах не позволяет проследить изменение спектров фотолюминесценции (ФЛ) с ростом парциального давления мышьяка. Интерпретация спектров ФЛ выглядит недостаточно убедительно как в области примесной, так и краевой люминесценции. Противоречива теоретическая модель, на кото-

рой основан анализ формы спектров краевой люминесценции в работе [2]. Появление примесных полос на спектрах слоев, выращенных при большом избыточном давлении мышьяка, авторы приписывают дефектам GaAs, хотя вероятность их образования в этих условиях мала.

В данной работе приведены результаты спектральных исследований легированных кремнием слоев GaAs, выращенных на подложках с ориентациями (100), (111)A и (111)B при различных соотношениях мышьяка и галлия (в условиях как недостатка, так и избытка мышьяка). Анализ краевой полосы ФЛ дает информацию о механизмах межзонной рекомбинации, о концентрации и типе свободных носителей. Изучение примесной области спектра позволяет получить сведения о природе структурных дефектов, вызванных отклонением от стехиометрии.

Исследованные образцы имели нелегированный буферный слой толщиной 0,5 мкм и верхний легированный кремнием слой толщиной 0,2 мкм. Соотношение парциальных давлений мышьяка и галлия в ростовой камере  $g = P_{As}/P_{Ga}$  изменялось в широких пределах ( $g = 14-77$ ) путем вариации давления As<sub>4</sub> при постоянном давлении галлия. В каждом технологическом процессе выращивались слои всех трех ориентаций. Температура кремниевого источника была одинаковой для всех процессов и задавалась таким образом, чтобы при  $g \approx 30$  обеспечить в слоях GaAs (100) концентрацию свободных электронов  $n \approx 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Тип проводимости определялся вольт-емкостным методом; концентрации свободных электронов были известны только для трех образцов из измерений эффекта Холла. Технологические параметры условий роста сведены в таблицу. Здесь же приведены энергии максимумов спектральной интенсивности краевой люминесценции  $E_{e-h}$  и концентрации, полученные из электрофизических измерений ( $n$ ) и в результате анализа формы спектра краевой полосы ФЛ ( $n_{ФЛ}$ ). Как видно из таблицы, слои GaAs с ориентацией поверхности (100) и (111)B имели проводимость  $n$ -типа во всем интервале давлений мышьяка, слои GaAs (111)A при низких давлениях мышьяка ( $g \leq 30$ ) имели проводимость  $p$ -типа, а при более высоких –  $n$ -типа.

Измерения ФЛ проводились в оптическом криостате при температуре жидкого азота. Возбуждение осуществлялось непрерывным аргоновым лазером с длиной волны 488 нм. Диапазон плотностей возбуждения с учетом отражения от структуры составлял  $10^2-2,5 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$ , что по нашим оценкам соответствовало концентрациям фотовозбужденных носителей  $3 \cdot 10^{15}-8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Технологические и экспериментальные параметры исследованных образцов

Номер образца	Ориентация	$g = P_{As}/P_{Ga}$	Тип проводимости	$E_{e-h}$ , эВ	$n$ , $10^{17} \text{ см}^{-3}$	$n_{ФЛ}$ , $10^{17} \text{ см}^{-3}$
B1	(111)B	14	$n$	1,512	—	4,5
B2		28		1,529	—	9,5
B3		30		1,530	—	10,0
B4		77		1,532	—	11,0
A1	(111)A	14	$p$	1,509	—	—
A2		20		1,503	—	—
A3		28		—	—	—
A4		30	$n$	1,523	—	8,0
A5		43		1,528	—	9,0
A6		77		1,530	9	9,8
1	(100)	14	$n$	1,521	7	7,5
2		28		1,528	—	8,5
3		30		1,528	—	9,2
4		43		1,531	10	10,0



Нормированные спектры ФЛ исследованных структур представлены на рис.1. Спектры ФЛ слоев, выращенных на подложках (100), как правило, состоят из одной краевой полосы во всем исследуемом диапазоне давлений мышьяка. Спектры слоев GaAs с ориентацией (111)А и (111)В имеют более сложный вид и содержат примесные пики, энергия и интенсивность которых зависит от условий выращивания.

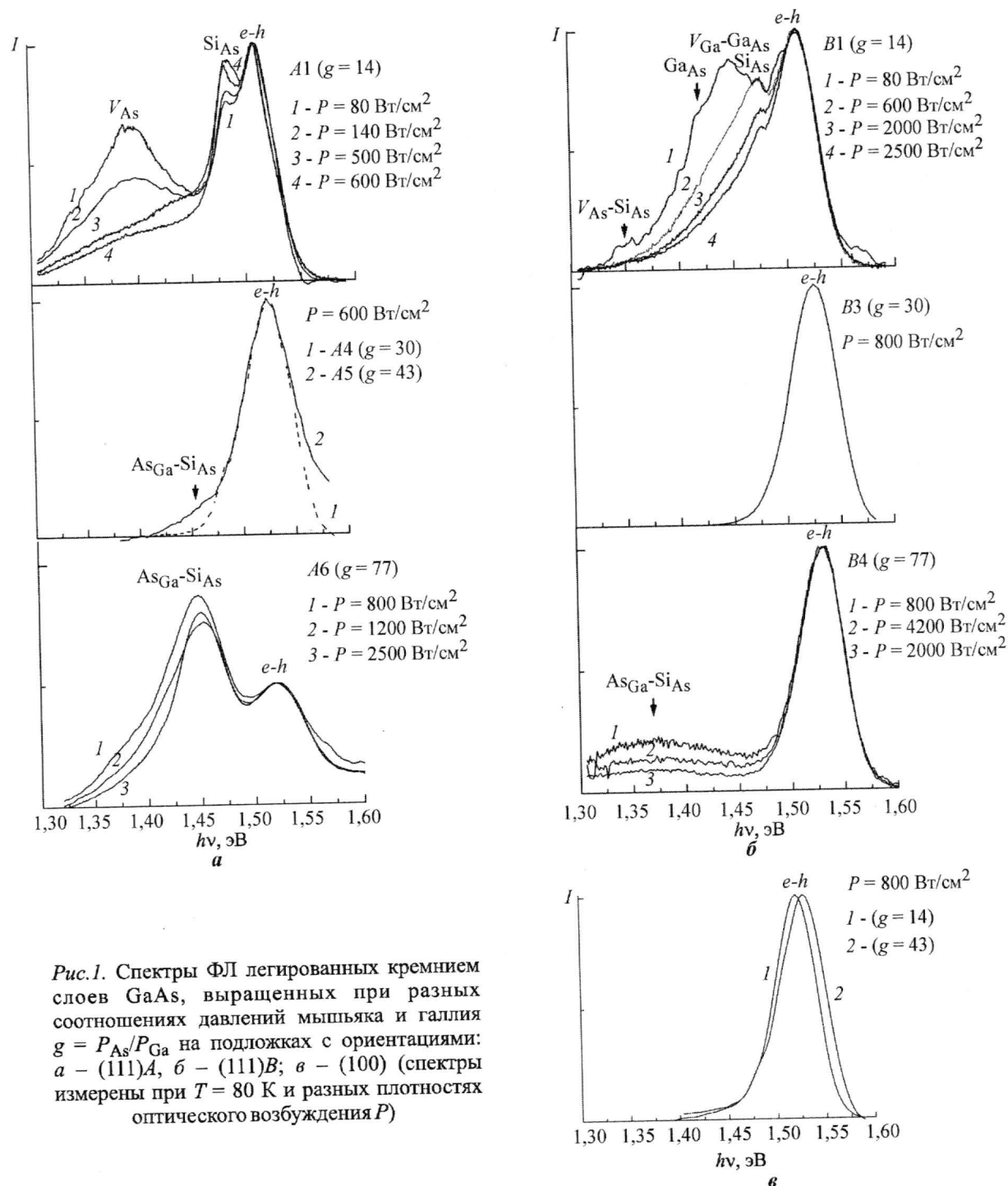


Рис.1. Спектры ФЛ легированных кремнием слоев GaAs, выращенных при разных соотношениях давлений мышьяка и галлия  $g = P_{As}/P_{Ga}$  на подложках с ориентациями: а – (111)А, б – (111)В; в – (100) (спектры измерены при  $T = 80$  К и разных плотностях оптического возбуждения  $P$ )

Максимумы спектральной интенсивности краевой ФЛ слоев  $n$ -GaAs всех ориентаций сдвинуты в сторону более высоких энергий относительно ширины запрещенной зоны нелегированного GaAs. Такое поведение характерно для межзонной рекомбинации ( $e$ - $h$ -переходы) в сильно легированных вырожденных полупроводниках  $n$ -типа и обычно объясняется смещением уровня Ферми в глубь зоны проводимости с ростом концентрации свободных электронов (эффектом Бурштейна–Мосса).

На рис.2 показано изменение энергии максимума краевой полосы ФЛ слоев GaAs  $n$ -типа с увеличением парциального давления мышьяка. Для всех ориентаций это изменение носит одинаковый характер – рост и дальнейшее насыщение величины  $E_{e-h}$ . При одинаковых значениях  $g$  сдвиг Бурштейна–Мосса и, следовательно, концентрация электронов в слоях с ориентацией (111)А меньше, чем в слоях с ориентацией (100) и (111)В. Это говорит о том, что при одинаковых условиях роста для образования донорных состояний Si<sub>Ga</sub> поверхность (111)А является менее предпочтительной, чем поверхности (111)В и (100).

**Анализ краевой полосы ФЛ слоев  $n$ -GaAs.** Анализ краевой полосы на экспериментальных спектрах слоев  $n$ -GaAs проведен на основе подходов и соотношений теории краевой люминесценции сильно легированных полупроводников, учитывающей флуктуации потенциала краев разрешенных зон вследствие неоднородного распределения примеси [4]. В вырожденных образцах  $n$ -типа при температуре жидкого азота доминирующим механизмом рекомбинации является рекомбинация свободных электронов с дырками, локализованными во флуктуационных состояниях «хвоста» валентной зоны.

Спектральная интенсивность излучения вычислялась по формуле:

$$I(h\nu) = h\nu \int_{\max(E-h\nu, 0)}^{\infty} W(E_e, E_h) \rho_c(E_e) q_e(E_e) \rho_v(E_h) q_h(E_h) dE_h,$$

где  $E_e$  и  $E_h$  – энергии электронов и дырок;  $W(E_e, E_h)$  – вероятность их излучательной рекомбинации;  $\rho_c(E_e)$  и  $\rho_v(E_h)$  – плотности состояний для электронов и дырок соответственно;  $q_e(E_e)$  и  $q_h(E_h)$  – функции заполнения этих состояний;  $h\nu = |E_h - E_e|$  – энергия излученного фотона. Плотность состояний в «хвосте» валентной зоны описывалась формулой, справедливой для гауссовых флуктуаций:  $\rho_v = \rho_0 \exp(-E_h^2/2\gamma^2)$ , где  $\gamma$  – среднеквадратичная амплитуда флуктуаций.

При используемых уровнях возбуждения концентрация неравновесных носителей  $\Delta n$ ,  $\Delta p$  не превышала  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , т.е. выполнялось условие  $\Delta n$ ,  $\Delta p \ll n_0, p_0$ , где  $n_0$ ,  $p_0$  – концентрации основных носителей. Таким образом, при расчете спектров излучения материала  $n$ -типа можно считать, что  $n = n_0$  и  $p = \Delta p$ . Необходимый для расчета параметр  $\theta$  (отношение коэффициентов захвата электронов и дырок в локализованные состояния «хвоста» валентной зоны) в GaAs составляет  $10^{-1}$ – $10^{-3}$  [4]. Расчет спектров

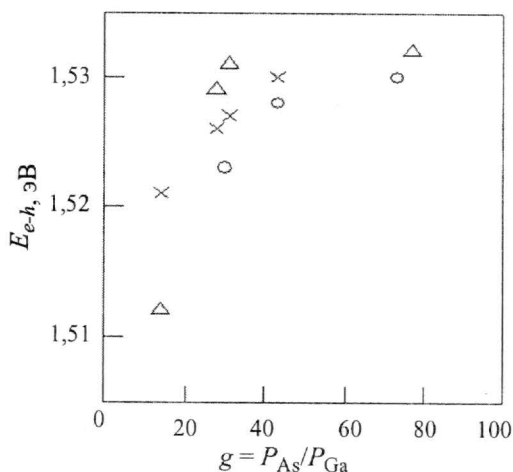


Рис.2. Зависимость энергии максимумов спектров краевой ФЛ при  $T = 80$  К слоев  $n$ -GaAs с ориентацией поверхности (111)А, (111)В и (100) от отношения парциальных давлений мышьяка и галлия: ○ – (111)А; △ – (111)В; × – (100)



проводился на ЭВМ численным интегрированием. При расчете среднеквадратичная амплитуда флуктуаций  $\gamma$  вычислялась по известной формуле [4]:

$$\gamma_0 = \sqrt{2\pi} \frac{e^2}{\varepsilon} \sqrt{Nr_0(n)}, \quad (1)$$

где  $r_0(n)$  – характерный размер флуктуаций, равный дебаевскому радиусу экранирования;  $n$  – концентрация электронов;  $N = N_A + N_D$  – полная концентрация примесей. При коррелированном распределении примеси размер и амплитуда флуктуаций уменьшаются ( $r < r_0$  и  $\gamma < \gamma_0$ ).

Для количественного описания экспериментальных спектров необходимо знание величин  $N$  и  $n$ . В рассматриваемом случае задача облегчается тем, что все исследованные образцы имеют одинаковую полную концентрацию примеси  $N = N_{Si}$  и различие спектральных характеристик слоев может быть связано только с изменением концентрации свободных электронов за счет перераспределения долей кремния, замещающего галлий и мышьяк. При этих условиях удобно анализировать зависимости  $E_{e-h}(n)$ . Для каждого образца проведена процедура подгонки расчетных и экспериментальных спектров путем вариации параметров  $n$  и  $\gamma$ . При расчетах  $N = 1,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , параметр  $\theta = 10^{-1}$ .

Сравнение экспериментальных и теоретических спектров показало, что расчет, проведенный при  $\gamma = \gamma_0$ , не описывает форму спектров и дает существенно меньшие значения  $E_{e-h}$ , чем наблюдается в эксперименте (рис.3, кривые 1, 2). Для всех образцов хорошее согласие экспериментальных и расчетных спектров достигается при  $\gamma = 13 \text{ мэВ}$ , что примерно вдвое меньше значений  $\gamma_0$ , рассчитанных по формуле (1) для случайного распределения примеси, при этом выбор параметра  $\theta$  в пределах  $10^{-1} - 10^{-3}$  на результаты расчета практически не влияет (рис.3, кривые 1', 2'). Это, по-видимому, отражает специфику поведения кремния при выращивании GaAs методом МЛЭ и свидетельствует о значительном влиянии корреляции на распределение ионов кремния при температуре роста.

В таблице для всех образцов приведены подгоночные значения концентраций  $n_{\text{ФЛ}}$ , при которых достигалось наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных спектров. Из таблицы видно, что в тех образцах, для которых концентрации свободных электронов известны из электрофизических измерений, значения  $n$  и  $n_{\text{ФЛ}}$  очень близки. Это позволяет считать достоверными значения  $n_{\text{ФЛ}}$  для остальных образцов и использо-

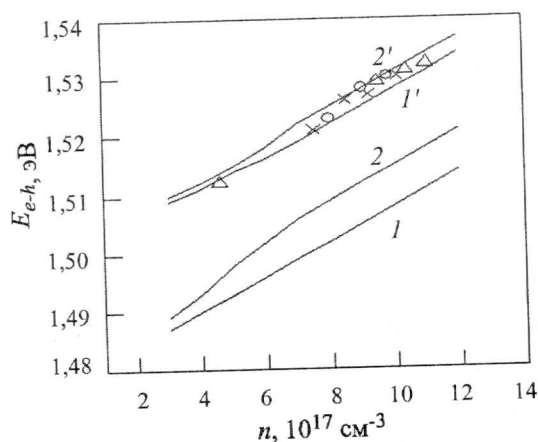


Рис.3. Зависимости энергии максимума спектров краевой ФЛ от концентрации электронов, рассчитанные в рамках теории [4]:  $\gamma = \gamma_0$  (кривые 1, 2),  $\gamma = 0,5 \gamma_0$  (кривые 1', 2'),  $\theta = 10^{-3}$  (кривые 1, 1'),  $\theta = 10^{-1}$  (кривые 2, 2'),  $N_{Si} = 1,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Экспериментальные значения  $E_{e-h}(n_{\text{ФЛ}})$ : о – (111)A; Δ – (111)B; × – (100)

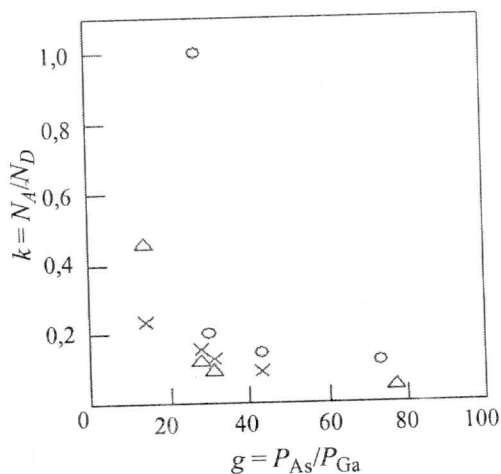


Рис.4. Зависимость степени компенсации в n-GaAs с ориентациями (111)A, (111)B и (100) от отношения давлений мышьяка и галлия: о – (111)A; Δ – (111)B; × – (100)

вать ФЛ в качестве бесконтактного метода оценки концентрации свободных электронов и степени компенсации в легированном кремнием GaAs, выращенном методом МЛЭ. Значения компенсации  $k = N_A/N_D$  для образцов *n*-GaAs, выращенных на поверхностях различной ориентации при различных давлениях мышьяка, представлены на рис.4. Для всех ориентаций с ростом давления мышьяка компенсация уменьшается, причем наиболее сильно – при малых давлениях. При всех давлениях мышьяка компенсация в слоях GaAs (111)А больше, чем в слоях с ориентациями (100) и (111)В.

Следует отметить, что выбранная модель энергетических состояний достаточно хорошо описывает и положение максимума, и форму экспериментальных спектров. В соответствии с теорией [4] для всех образцов экспоненциальный спад интенсивности на коротковолновом фронте спектров краевой ФЛ характеризуется энергией  $\gamma$ , в то время как в отсутствие флуктуаций потенциала – величиной  $\approx kT$ .

**Примесные полосы.** Как видно на рис.1, изменение давления мышьяка приводит к существенным изменениям в примесной области спектров образцов с ориентацией (111)А и (111)В. На спектрах слоев с ориентацией (100) заметных примесных полос не наблюдалось во всем исследованном диапазоне давлений мышьяка.

Известно, что при любом отклонении от стехиометрии в процессе роста в кристалле образуются структурные дефекты, связанные с избытком As или Ga, такие как вакансии  $V_{Ga}$ ,  $V_{As}$ , антиструктурные состояния  $As_{Ga}$ ,  $Ga_{As}$  (атомы мышьяка в узлах галлия и атомы галлия в узлах мышьяка соответственно), межузельные атомы  $As_i$ ,  $Ga_i$ , а также более сложные комплексы этих дефектов друг с другом и с атомами примеси. Концентрация нестехиометрических дефектов может быть довольно значительной: антиструктурных состояний – до  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ , а вакансий – до  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  [5]. Эти дефекты могут серьезно влиять на электрические и оптические свойства GaAs: принимать участие в процессах самокомпенсации, выступать в качестве ловушек или рассеивающих и рекомбинационных центров, вызывать деградацию квантовой эффективности светодиодов и лазеров и т.д.

Хотя структурные дефекты в GaAs исследуются давно, многие вопросы остаются спорными и сейчас. Есть разногласия в понимании того, каким образом стабильность дефектов зависит от уровня Ферми, т.е. от концентрации и типа свободных носителей в кристалле. Например, при выращивании GaAs в условиях избытка мышьяка согласно работам [6, 7] в материале *n*-типа доминирующим дефектом должны быть вакансии галлия  $V_{Ga}$ , а в материале *p*-типа – антиструктурные дефекты  $As_{Ga}$  и комплексы с их участием. Более поздние расчеты [5, 8], напротив, приводят к выводу, что для всех значений химического потенциала дефектов  $As_{Ga}$  значительно больше, чем вакансий  $V_{Ga}$ . Кроме того, не ясна роль кремния в процессах дефектообразования в легированном кремнием GaAs.

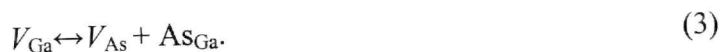
Рассмотрим образцы А1 и В1, выращенные в условиях недостатка мышьяка при соотношении давлений  $g = 14$  на подложках GaAs с ориентациями (111)А и (111)В соответственно. На спектрах обоих образцов в непосредственной близости от краевой полосы ( $e-h$ ) наблюдался примесный пик с максимумом при энергии  $1,480 \pm 0,002 \text{ эВ}$ . Соответствующий акцепторный уровень хорошо известен из литературы и обычно приписывается кремнию, замещающему мышьяк в решетке арсенида

галлия ( $\text{Si}_{\text{As}}$ ). Помимо пика, связанного с состояниями  $\text{Si}_{\text{As}}$ , спектры этих образцов содержали широкие полосы, свидетельствующие о наличии более глубоких примесных состояний. На спектре образца *A1* наблюдалась полоса с энергией в максимуме 1,390 эВ, а на спектре образца *B1* — с энергией 1,445 эВ. При малых плотностях оптического возбуждения интенсивность этих полос сопоставима с интенсивностью краевой полосы, а с ростом возбуждения их относительная интенсивность резко падала.

Эти полосы не наблюдались на спектрах образцов *A4* и *B3*, выращенных при  $g = 30$ , т.е. в условиях, близких к стехиометрии. Несмотря на разную ориентацию ростовой поверхности этих образцов, их спектры не имели принципиальных различий и содержали только краевую полосу, соответствующую межзонной рекомбинации, в примесной области значительной люминесценции не наблюдалось. Небольшое различие в энергетическом положении краевых полос обусловлено разной концентрацией свободных электронов в этих образцах.

На спектрах слоев GaAs с ориентацией (111)*A*, выращенных при избыточном содержании мышьяка, возникает полоса с энергией  $1,452 \pm 0,002$  эВ. Интенсивность этой полосы растет с ростом парциального давления мышьяка: при  $g = 43$  (образец *A5*) она проявляется на спектре в виде слабого длинноволнового плеча, при  $g = 77$  (образец *A6*) — превышает интенсивность краевого излучения. При выращивании на подложках (111)*B* избыточное давление мышьяка сказывалось на спектрах ФЛ гораздо слабее, и лишь при  $g = 77$  (образец *B4*) появлялась слабая полоса с энергией  $\approx 1,37$  эВ.

Таким образом, наиболее интенсивные примесные полосы наблюдались на спектрах слоев, выращенных в условиях наибольшего отклонения от стехиометрии (при  $g = 14$  и  $g = 77$ ), когда велика вероятность образования собственных структурных дефектов: вакансий мышьяка  $V_{\text{As}}$  и антиструктурных дефектов  $\text{Ga}_{\text{As}}$  при недостатке мышьяка, вакансий галлия  $V_{\text{Ga}}$  и дефектов  $\text{As}_{\text{Ga}}$  при избытке мышьяка. Образование межузельных атомов  $\text{Ga}_i$  и  $\text{As}_i$  термодинамически гораздо менее выгодно и их концентрация незначительна [5, 6]. Изолированные вакансии могут трансформироваться в пары путем реакций [7]:



Стабильность пар, созданных в результате этих реакций, контролируется положением уровня Ферми: пара  $V_{\text{Ga}}\text{--Ga}_{\text{As}}$  стабильна в материале *n*-типа, а пара  $V_{\text{As}}\text{--As}_{\text{Ga}}$  — в материале *p*-типа.

Естественно предположить, что реакция (2) важна в образцах *A1* и *B1*, выращенных при низком давлении мышьяка ( $g = 14$ ), когда образуется большое количество вакансий мышьяка. Пара  $V_{\text{Ga}}\text{--Ga}_{\text{As}}$  образуется путем прыжка атома Ga по вакансиям  $V_{\text{As}}$ , при этом сильный донор превращается в сильный акцептор. В образце *B1*, имеющем проводимость *n*-типа, реакция сдвинута вправо, поэтому полосу с энергией 1,445 эВ можно связать с образованием пары  $V_{\text{Ga}}\text{--Ga}_{\text{As}}$  (соответствующий акцепторный уровень  $67 \pm 2$  мэВ). На длинноволновом фронте спектра образца *B1* при низкой плотности оптического возбуждения также проявляются слабые переходы с энергией  $\approx 1,435$  и  $\approx 1,360$  эВ. Переход с энергией 1,435 эВ указывает на наличие в небольшом ко-

личестве изолированных антиструктурных дефектов Ga<sub>As</sub>, которые, как известно, дают акцепторный уровень 77 мэВ [9]. Полоса с энергией 1,36 эВ в литературе связывается с рекомбинацией либо донорно-акцепторной пары V<sub>As</sub>–Si<sub>As</sub>, либо донорно-донорной пары As<sub>Ga</sub>–Si<sub>Ga</sub> [10]. В нашем случае возможно только первое объяснение, поскольку образец В1 выращен в условиях недостатка мышьяка.

В образце А1, имеющем проводимость *p*-типа (см. рис.1,а), реакция (2) сдвинута влево, т. е. существование изолированных вакансий мышьяка в этом образце энергетически более выгодно, чем образование антиструктурных пар. Поэтому примесная полоса в образце А1 в основном обусловлена переходами фотовозбужденных электронов с глубокого донорного уровня, создаваемого изолированными вакансиями мышьяка, в валентную зону. Энергия таких переходов составляет 1,39 эВ [10], что хорошо согласуется с энергетическим положением максимума наблюдаемой полосы. Кроме того, в формировании широкой полосы в образце А1 принимают участие донорно-акцепторные пары V<sub>As</sub>–Si<sub>As</sub> и антиструктурные дефекты Ga<sub>As</sub> (энергии переходов 1,36 и 1,435 эВ соответственно). На рисунке видно, что с ростом оптического возбуждения интенсивность переходов, связанных с вакансиями мышьяка (1,39 и 1,36 эВ), резко падает, при этом растёт относительный вклад переходов из зоны проводимости на акцепторный уровень Si<sub>As</sub>.

Рассмотрим примесную полосу с максимумом  $1,452 \pm 0,002$  эВ в образце А6, выращенном при большом избыточном давлении мышьяка. Образующиеся в этих условиях вакансии галлия согласно реакции (3) в материале *n*-типа не трансформируются в антиструктурные пары и могут существовать либо в изолированном состоянии, либо в комплексе с другими дефектами и примесями, например, в виде донорно-акцепторной пары Si<sub>Ga</sub>–V<sub>Ga</sub>. Однако полосу с энергией 1,452 эВ нельзя связать ни с V<sub>Ga</sub>, ни с Si<sub>Ga</sub>–V<sub>Ga</sub>, которым соответствуют переходы в более низкоэнергетической области (вблизи 1,2 эВ) [10]. Дефект, ответственный за эту полосу, скорее всего, относится к семейству дефектов, включающих состояния As<sub>Ga</sub>.

Согласно [5, 8] в условиях избытка мышьяка и в *n*-GaAs, и в полуизолирующем GaAs образование антиструктурных состояний As<sub>Ga</sub> энергетически более выгодно, чем образование вакансий и межузельных атомов. Хорошо известно, что изолированный As<sub>Ga</sub> (обычно отождествляемый с EL2-дефектом) и различные комплексы, включающие As<sub>Ga</sub>, играют большую роль в технологии приборов. В основном они создают в запрещенной зоне глубокие донорные уровни порядка сотен миллиэлектронвольт и не могут рассматриваться для объяснения наблюдаемой полосы. Однако в работе [11] предложена и рассчитана модель образования пары с энергией связи в несколько десятков миллиэлектронвольт. Согласно этой модели As<sub>Ga</sub> существует как изолированный дефект при высоких температурах, а при охлаждении образца до температур ниже комнатной связывается с мелким подвижным акцептором. В отличие от обычной электростатической связи, энергия связи такой пары не является монотонной функцией расстояния между компонентами и зависит от электронной плотности As<sub>Ga</sub> в том месте, где расположен акцептор, поэтому соответствующие переходы должны перекрывать довольно широкую полосу энергий. При расчете в [11] для примера в качестве акцептора взята C<sub>As</sub>; в нашем случае таким акцептором может быть Si<sub>As</sub>, параметры которого близки к



параметрам  $C_{As}$ . Исходя из этой модели, наиболее вероятным дефектом, ответственным за широкую полосу с энергией в максимуме 1,452 эВ на спектре образца А6, является пара  $As_{Ga}-Si_{As}$  (в максимуме полосы соответствующая энергия связи составляет 55 мэВ). Причем количество этих дефектов должно быть довольно значительным, поскольку концентрация акцепторов  $Si_{As}$  составляет  $5 \cdot 10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , а состояний  $As_{Ga}$  на порядки больше [5]. Действительно, на спектре образца А6 интенсивность примесной полосы остается выше интенсивности краевой при всех плотностях оптического возбуждения, даже при максимальном возбуждении (при концентрации фотовозбужденных носителей  $\approx 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) заметного насыщения этой полосы не происходит. Следует отметить, что концентрация дефектов, вызванных недостатком мышьяка (вакансий  $V_{As}$  в образце А1 и пар  $V_{Ga}-Ga_{As}$  в образце В1) значительно меньше. Для насыщения полос, связанных с этими дефектами, требуются на порядок более низкие плотности возбуждения.

На спектре образца В4, который выращен при таком же высоком давлении мышьяка, как и образец А6, но на подложке GaAs (111)В, наблюдается слабая широкая полоса с энергией 1,36 эВ, обусловленная рекомбинацией донорно-донорных пар  $As_{Ga}-Si_{Ga}$  [10]. Полоса, связанная с образованием пары  $As_{Ga}-Si_{As}$ , отсутствует, поскольку при ориентации (111)В кремний преимущественно встраивается в подрешетку галлия и концентрация  $Si_{As}$ -состояний в этом образце очень мала.

Таким образом, исследования ФЛ легированных кремнием слоев GaAs показали, что при уровне легирования кремнием  $\approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$  спектры краевой полосы хорошо описываются в рамках единой теоретической модели, учитывающей флуктуации потенциала краев зон вследствие неоднородного распределения примеси. При этом амплитуда флуктуаций для всех исследованных образцов *n*-типа независимо от ориентации поверхности и давления мышьяка в процессе роста оказалась примерно вдвое меньше значений  $\gamma_0$ , рассчитанных для случайного распределения примеси, что, по-видимому, отражает специфику распределения примеси при методе МЛЭ.

Формирование примесного спектра связано с образованием нестехиометрических структурных дефектов, причем природа этих дефектов различна в слоях с ориентацией (111)А и (111)В. В условиях недостатка мышьяка в *p*-GaAs (111)А в основном образуются вакансии  $V_{As}$  и пары  $V_{As}-Si_{As}$ , а в *n*-GaAs(111)В – пары  $V_{Ga}-Ga_{As}$ . При избыточном давлении мышьяка в *n*-GaAs(111)А доминируют антиструктурные дефекты  $As_{Ga}$ , которые при достаточно низких температурах образуют пары  $As_{Ga}-Si_{As}$ , ответственные за появление широкой полосы с энергией в максимуме 1,452 эВ.

*Материалы статьи были доложены на III Международной научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, технике и образовании» (Республика Абхазия, Пицунда, 19–29 сентября 2007 г.)*

### Литература

1. Si-doping and MBE growth of GaAs on tilted (111)A substrates / M. Shigeta, Y. Okano, H. Seto et al. // J. of Crystal Growth 111. – 1991. – P. 284–287.
2. Piazza F., Pavesi L., Henini M., Johnston D. Effect of As overpressure on Si-doped (III)A GaAs grown by molecular beam epitaxy: a photoluminescence study // Semicond. Sci. Technol. – 1992. – Vol. 7. – P. 1504–1507.

3. *Pavesi L., Henini M., Johnston D.* Influence of the As overpressure during the molecular beam epitaxy growth of Si-doped (211)A and (311)A GaAs // Appl. Phys. Lett. – 1995. – Vol. 66, № 21. – P. 2846–2848.
4. *Леванюк А.П., Осипов В.В.* Краевая люминесценция прямозонных полупроводников // УФН. – 1981. – Т. 133. – В. 3. – С. 427–477.
5. *Schick J.T., Morgan C.G., Papoulias P.* First-principles study of As interstitials in GaAs: convergence, relaxation and formation energy // Phys. Rev. B. – 2002. – Vol. 66. – P. 195302-(1–10).
6. *Baraff G.A., Schluter M.* Electronic structure, total energies and abundance of the elementary point defects in GaAs // Phys. Rev. Lett. – 1985. – Vol. 55, № 12. – P. 1327–1330.
7. *Baraff G.A., Schluter M.* Binding and formation energies of native defect pairs in GaAs // Phys. Rev. B. – 1986. – Vol. 33, № 10. – P. 7346–7348.
8. *Seong H., Lewis L.J.* Tight-binding molecular-dynamics study of point defects in GaAs // Phys. Rev. B. – 1995-II. – Vol. 52, № 8. – P. 5675–5684.
9. *Yu P.W., Mitchel W.C., Mier M.G., Li S.S. et al* Evidence of intrinsic double acceptor in GaAs // Appl. Phys. Lett. – 1982. – Vol. 41, № 6. – P. 532–534.
10. *Pavesi L., Nguyen Hong Ky, Ganiere J.D., Reinhard F.K.* Role of point defects in the silicon diffusion in GaAs and AlGaAs and related superlattice disordering // J. Appl. Phys. – 1992. – Vol. 71, № 5. – P. 2225–2237.
11. *Overhof H., Spaeth J.-M.* Defect identification in the As<sub>Ga</sub> family in GaAs // Phys. Rev. B. – 2005. – Vol. 72. – P. 115205-(1-10).

Статья поступила  
12 октября 2007 г.

**Яременко Наталья Георгиевна** – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ИРЭ РАН. *Область научных интересов:* физика полупроводников, фотолюминесцентная спектроскопия полупроводниковых материалов и структур пониженной размерности.

**Карачевцева Мария Виссарионовна** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИРЭ РАН. *Область научных интересов:* физика полупроводников, программирование, математическое моделирование физических процессов в структурах пониженной размерности.

**Страхов Валерий Александрович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИРЭ РАН. *Область научных интересов:* физика полупроводников, фотолюминесцентная спектроскопия полупроводниковых материалов и структур пониженной размерности.

**Галиев Галиб Бариевич** – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ИСВЧПЭ РАН. *Область научных интересов:* твердотельная микро- и наноэлектроника, молекулярно-лучевая эпитаксия полупроводниковых материалов.

**Мокеров Владимир Григорьевич** – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, директор ИСВЧПЭ РАН. *Область научных интересов:* твердотельная микро- и наноэлектроника, технология полупроводниковых материалов и приборов.

## Исследование газочувствительных свойств медьсодержащего полиакрилонитрила

*И.С.Аль-Хадрами, А.Н.Королев, Т.В.Семенистая, Т.Н.Назарова, В.В.Петров*

Технологический институт Южного федерального университета в г. Таганроге

Получены образцы пиролизованного полиакрилонитрила, содержащие соединения меди. Определено влияние содержания соединений меди и температуры ИК-отжига на удельное сопротивление и морфологию поверхности полученных образцов. Установлена зависимость коэффициента газочувствительности полученных образцов от морфологии поверхности и удельного сопротивления.

Синтез материалов, обладающих газовой чувствительностью [1], представляет интерес, поскольку идентификация и определение содержания соединений, присутствующих в воздухе, является важной задачей экологического мониторинга.

Традиционно при создании сенсоров для определения химического состава воздушной среды [2] используются оксидные пленки смешанного состава. Основным недостатком таких материалов является высокая рабочая температура, что увеличивает затраты энергии при эксплуатации, сокращает ресурс работы сенсоров и требует взрывобезопасного исполнения для анализа горючих газов и паров.

Цель данной работы – синтез и изучение металлоорганических материалов, чувствительных к химическим реагентам и не обладающих указанными недостатками [3].

**Экспериментальная часть.** В работе исследованы удельное сопротивление, морфология поверхности и газочувствительность сенсорных элементов на основе пленок медьсодержащего ИК-пиролизованного полиакрилонитрила.

Пленки получали поливом коллоидного раствора ПАН/ $\text{CuCl}_2$  в диметилформамиде на кварцевые подложки и его равномерным распределением по поверхности подложки методом центрифугирования. Образцы пленок сушили в термошкафу при температуре 80–90 °С. Обработку пленок ИК-излучением проводили на установке ФОТОН. В качестве источника излучения использовали галогенные лампы КГ-220, максимум излучения которых приходится на область 0,8–1,2 мкм.

Известно [4], что электропроводящие свойства ПАН проявляются в результате его термической обработки. Процесс термической обработки ПАН можно условно разделить на три стадии: окислительная термостабилизация (150–220 °С), карбонизация в атмосфере инертного газа (500–800 °С) и графитация (1200–3000 °С).

Большинство исследователей приходит к заключению, что термическое превращение ПАН приводит к получению полимера, основная часть которого состоит из конденсированных пиридиновых циклов, имеющих сопряжение как по связям  $\text{C}=\text{C}$ , так и по связям  $\text{C}=\text{N}$ .

Процесс внутримолекулярной циклизации, обусловленный переходом связи  $C\equiv N$  в связь  $C=N$ , заканчивается в основном на ранних стадиях превращения (до 270 °С). Об этом свидетельствуют результаты проведенных исследований пленок ПАН, отожженных при температурах 250 °С, методом ИК-спектроскопии. В ИК-спектрах наблюдается уменьшение интенсивности полосы поглощения, характерной для связи  $C\equiv N$ , и возрастание интенсивности полос поглощения в области, характерной для сопряженных связей [5].

В результате термической обработки ПАН становится полимерным полупроводником с системой сопряженных связей и туннельным механизмом переноса заряда, энергия активации которого мала и с ростом степени сопряжения в макромолекуле стремится к нулю [6].

Введение в пленки ПАН соединений переходных металлов приводит к комплексообразованию металла с нитрильными группами полимера. При этом образуются донорно-акцепторные комплексы двух типов за счет взаимодействия  $d$ -орбиталей переходного металла: либо с неподеленной электронной парой атома азота, либо с  $\pi$ -электронами тройной связи  $C\equiv N$  [7].

Измерения удельного сопротивления полученных образцов проводились на вычислительно-измерительном комплексе удельного электрического сопротивления ВИК-УЭС 07 четырехзондовым методом [8].

Морфологию поверхности образцов изучали на сканирующем зондовом микроскопе Solver P 47 методом атомно-силовой микроскопии.

Для определения газочувствительности пленочных образцов измеряли поверхностное сопротивление на калибровочном стенде, описанном в работе [9]. Величина поверхностного сопротивления газочувствительной пленки изменялась в зависимости от концентрации диоксида азота и аммиака в измерительной камере. Отклик сенсора на газ оценивался с помощью коэффициента газочувствительности:

$$S = (R_0 - R_g)/R_0, \text{ при } R_0 > R_g,$$

$$S = (R_g - R_0)/R_g, \text{ при } R_0 < R_g,$$

где  $R_0$  – начальное сопротивление образца пленки;  $R_g$  – стационарное значение сопротивления образца после подачи детектируемого газа [10].

**Результаты и их обсуждение.** Присутствие небольших количеств соединений меди (до 3 мас. % Cu) в образцах ПАН снижает удельное сопротивление пленок более чем в 10 раз в сравнении с чистым ПАН. Это, возможно, объясняется тем, что электропроводность медьсодержащих пленок ПАН определяется не только электропроводностью самого ПАН, но и электропроводностью соединений меди, входящих в состав пленки.

Присутствие больших количеств соединений меди (5–10 мас. % Cu) в полимере практически не приводит к уменьшению его удельного сопротивления (табл.1).

Повышение температуры ИК-отжига также приводит к снижению удельного сопротивления образцов, причем степень этого снижения для пленок чистого ПАН более



значительна по сравнению с медьсодержащими образцами. Для последних характерно более плавное снижение удельного сопротивления по мере увеличения содержания меди в образцах (табл.1).

По результатам исследований морфологии поверхности полученных образцов установлено, что температура ИК-отжига и содержание соединений меди в пленках влияет на формирование их поверхности. На основе АСМ-изображения поверхности образцов пленок с помощью программы Image Analysis были рассчитаны значения площади их поверхности. Оказалось, что содержание соединений меди и температуры ИК-отжига приводят к увеличению поверхности образцов пленок (табл.2).

Таблица 1

**Удельное сопротивление медьсодержащих пленок ПАН (Ом·см)  
при различной температуре ИК-отжига**

Содержание Cu, мас. %	$T_{отж}, ^\circ\text{C}$			
	500	600	650	800
0	$2,7 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^9$	$2,6 \cdot 10^7$	$6,1 \cdot 10^3$
0,2	$4 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^8$	$6,3 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^3$
1	$2 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^5$	$5,8 \cdot 10^2$
3	$4,2 \cdot 10^8$	$4,18 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^4$	$4,5 \cdot 10^2$
5	$4 \cdot 10^8$	$1,6 \cdot 10^6$	$1,25 \cdot 10^4$	$4,3 \cdot 10^2$
10	$1,8 \cdot 10^8$	$1,5 \cdot 10^6$	$7,5 \cdot 10^3$	$4,0 \cdot 10^2$

Таблица 2

**Площадь поверхности медьсодержащих пленок ПАН (мкм<sup>2</sup>)  
при различной температуре ИК-отжига**

Содержание Cu, мас. %	$T_{отж}, ^\circ\text{C}$		
	600	700	800
0	178,96	111,6437	120,8385
0,2	137,02	90,16824	137,0799
3	79,2931	107,3997	160,668
5	86,98572	125,73673	173,3251
10	109,0244	156,7419	181,3482

Значения коэффициента газочувствительности медьсодержащих пленок ПАН на диоксид азота и аммиак были рассчитаны на основании измеренных значений поверхностного сопротивления и представлены в табл.3 и 4. Характер изменения поверхностного сопротивления полимерной пленки определяется окислительно-восстановительной природой газа.

Таблица 3

Коэффициент газочувствительности медьсодержащих пленок ПАН на  $\text{NO}_2$  (отн. ед.)  
(рабочая температура 25 °C)

C(NO <sub>2</sub> ), ppm	T <sub>отж</sub> , °C															
	500				600				700				800			
	Содержание Cu, масс. %															
	0	1	3	0	1	3	0	1	3	0	1	3				
36,5	0	0,216	0,270	0,160	0,219	0,126	0,074	0,038	0,072	0,110	0,120	0,082	0	1	3	
73	0	0,293	0,314	0,190	0,310	0,142	0,076	0,046	0,082	0,140	0,129	0,079	0,028	0,002	0,002	
146	0	0,296	0,369	0,220	0,321	0,182	0,142	0,050	0,119	0,150	0,138	0,115	0,020	0,003	0,003	
219	0	0,327	0,372	0,245	0,337	0,184	0,158	0,053	0,135	0,173	0,141	0,116	0,039	0,004	0,005	
255	0	0,329	0,373	0,250	0,340	0,189	0,161	0,073	0,148	0,192	0,145	0,119	0,041	0,008	0,005	
													0,043	0,008	0,006	

Таблица 4

Коэффициент газочувствительности медьсодержащих пленок ПАН на  $\text{NH}_3$  (отн. ед.)  
(рабочая температура 25 °C)

C(NH <sub>3</sub> ), ppm	T <sub>отж</sub> , °C															
	500				600				700				800			
	Содержание Cu, масс. %															
	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3				
73	0,003	0,034	0,003	0,021	0,008	0,013	0,004	0,004	0,001	0,003	0,002					
146	0,007	0,114	0,004	0,048	0,02	0,035	0,013	0,005	0,01	0,003	0,003					

Воздействие на сенсорный элемент газа-акцептора  $\text{NO}_2$  приводит к уменьшению поверхностного сопротивления (рис.1), что указывает на  $p$ -тип проводимости исследуемых образцов.

Исследования сенсорных свойств медьсодержащих пленок ПАН при детектировании газа-донора  $\text{NH}_3$  не выявили их заметной чувствительности к воздействию данного газа.

На рис.2 представлена кинетика адсорбционного отклика на диоксид азота пленки, имеющей наилучшие сенсорные характеристики.

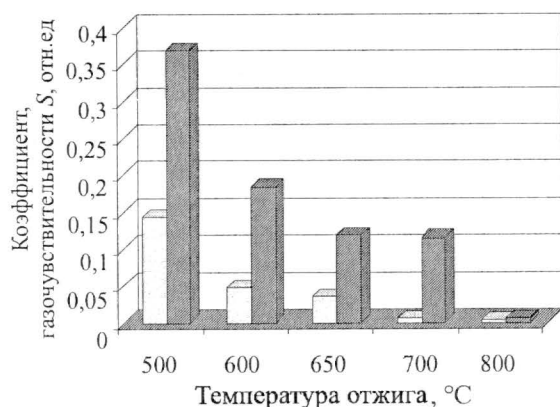


Рис.1. Коэффициент газочувствительной медьсодержащей пленки ПАН (3 масс. % Cu) на  $\text{NO}_2$  и  $\text{NH}_3$  в зависимости от температуры ИК-отжига: □ –  $\text{NH}_3$  (144 ppm); ■ –  $\text{NO}_2$  (144 ppm)

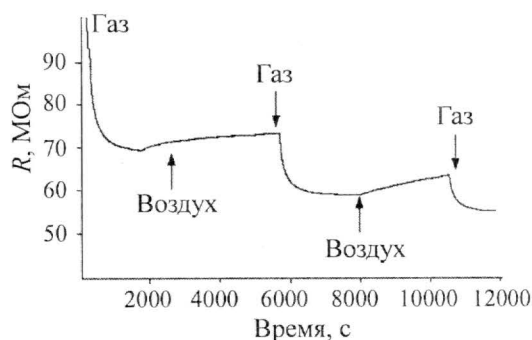


Рис.2. Кинетика адсорбционного отклика на  $\text{NO}_2$  образца пленки ( $T_{\text{отж}} = 500^\circ\text{C}$ , 3 мас. % Cu) при периодическом воздействии 219 ppm  $\text{NO}_2$

Таким образом, определено влияние содержания соединений меди и температуры ИК-отжига на электропроводность и морфологию поверхности образцов пленок: повышение концентрации соединений меди и температуры ИК-отжига приводит к увеличению электропроводности образцов; повышение концентрации соединений меди в образцах приводит к увеличению площади поверхности; увеличение температуры ИК-отжига приводит к уменьшению площади поверхности пленок.

Определено влияние морфологии и удельного сопротивления образцов пленок на их газочувствительные характеристики, в соответствии с которыми установлено, что полученные пленки проявляют сенсорные свойства на диоксид азота. Максимальная газочувствительность зарегистрирована у образца, полученного при  $T_{\text{отж}} = 500^\circ\text{C}$  с содержанием меди 3 мас. %.

### Литература

1. Филаретов Г.Ф. Датчики и приборы для применения в задачах экологического мониторинга // Приборы и системы управления. – 1996. – № 5. – С. 26–28.
2. Liming Dai, Prabhu Soundarrajan, Taehyung Kim. Sensors and sensor arrays based on conjugated polymers and carbon nanotubes // Pure Appl. Chem. – 2002. – Vol. 74, № 9. – P. 1753–1772.
3. Зиповьев К.В., Вихлянец О. Ф., Грибов О.Г. Получение окисных пленок из растворов, использование их в электронной технике // М.: ЦНИИ. Электроника. – 1974. – 62 с.
4. Логинова Т.П. Процессы иммобилизации гексакарбониллов металлов VI в группы на полимерных матрицах с нитрильными группами // Автореферат дисс. на соискание уч. ст. к. х. н. – М., 1991.
5. Органические полупроводники / Л.С.Стильбанс, Л.Д.Розенштерн, А.В.Айрапетянц и др. // Под ред. А.В. Топчиева. – М.: Изд. АН СССР. – 1963. – 319 с.
6. Паушкин Я.М., Вишнякова Т.П., Лукин А.Ф., Низова С.А. Органические полимерные полупроводники. – М.: Химия, 1971. – 224 с.
7. Земцов Л.М., Карпачева Г.П. Химические превращения полиакрилонитрила под действием некогерентного инфракрасного излучения // Высокомолекулярные соединения. – 1994. – Т. 36, № 6. – С. 919–924.
8. Курносое А.И. Материалы для полупроводниковых приборов и интегральных микросистем. – М.: Высш. шк. – 1980. – С. 328.

9. **Петров В.В.** Автоматизированный стенд для калибровки сенсоров газа // Тез. докл. I Междунар. науч.-техн. конф. «Сенсорная электроника и микросистемные технологии» (Украина, Одесса, 1–5 июня 2004 г.) – 2004. – С. 288–289.

10. **Петров В.В.** К вопросу о чувствительности полупроводниковых химических сенсоров газа // Сенсор. – 2003. – № 1. – С. 48–50.

Статья поступила после доработки  
7 декабря 2007 г.

**Аль-Хадрами Ибрахим Сулейман** – аспирант кафедры химии и экологии ТТИ ЮФУ. *Область научных интересов:* сенсорные свойства металлорганических полимерных пленок.

**Королев Алексей Николаевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой химии и экологии ТТИ ЮФУ. *Область научных интересов:* теоретические основы модификации поверхности твердого тела, моделирование процессов распознавания образа химических соединений.

**Семенистая Татьяна Валерьевна** – кандидат химических наук, доцент кафедры химии и экологии ТТИ ЮФУ. *Область научных интересов:* синтез металлорганических полимеров и исследование их свойств.

**Назарова Татьяна Николаевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры химии и экологии ТТИ ЮФУ. *Область научных интересов:* газочувствительные сенсоры на основе неорганических материалов.

**Петров Виктор Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры химии и экологии ТТИ ЮФУ. *Область научных интересов:* теоретические основы и технология формирования газочувствительных материалов, модификация их поверхностных свойств.



## Конференции. Семинары II Московская межвузовская научно-практическая конференция «Студенческая наука»

### Семинар «Производственная безопасность и информационные технологии»

В ноябре–декабре 2007 г. на базе 14 вузов столицы под эгидой Московского студенческого центра, Московского городского координационного совета студенческих научных обществ и Правительства Москвы проводилась II Московская межвузовская научно-практическая конференция «Студенческая наука».

15 ноября 2007 г. в Московском государственном горном университете в рамках конференции состоялся семинар по тематике «**Производственная безопасность и информационные технологии**». Было представлено 33 доклада. С докладом «Исследование методов контроля физических и химических факторов воздействия с помощью инъекционных фотодиодов в охране труда» выступили студенты Московского государственного института электронной техники (технического университета): Сницар Д. (факультет микроприборов и технической кибернетики), Рухлов Д. и Онищенко Д. (факультет электроники и компьютерных технологий).

Лучшие работы были отмечены дипломами лауреатов.

Коллектив, работающий в студенческой научной лаборатории «Фотоника II-VI» кафедры общей физики МИЭТ, занял I место в номинации «Информационные технологии» (научный руководитель лаборатории старший преподаватель кафедры общей физики МИЭТ Лубегин Г.В.)

По итогам конференции 8 декабря 2007 г. в Центральном доме ученых состоялось чествование победителей и вручение дипломов и сертификатов на летний отдых на Черном море.



# МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.3.049.77.001

## Преобразователь кодов NRZ в NRZM на арсенидгаллиевых гетеропереходных биполярных транзисторах

*В.П.Тимошенков, В.А.Братов*

Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)

Рассмотрены аспекты проектирования интегральной схемы преобразователя NRZ-кода в NRZM-код на основе гетеропереходных арсенидгаллиевых транзисторов. Особенностью схемы является применение индуктивной коррекции, позволяющей расширить полосу пропускания преобразователя. Проведены компьютерное моделирование и экспериментальные исследования устройства для скорости передачи 12,5 Гбит/с. Экспериментальные результаты хорошо совпадают с результатами моделирования.

Преобразователи кода являются ключевыми блоками систем СВЧ-передачи цифровой информации. При скоростях передачи данных 10 Гбит/с и более становятся востребованными специализированные технологии изготовления интегральных транзисторов с высокой верхней граничной частотой. К этому типу относится технология создания гетеропереходных биполярных транзисторов (ГБТ) на основе арсенида галлия. Ее применение позволяет проектировать и создавать ИМС, обеспечивающие передачу данных со скоростями, значительно превышающими 10 Гбит/с. Оригинальность и новизна предлагаемых исследований заключается в разработке специальных схемотехнических решений для усилительных каскадов, выполненных по данной технологии и обеспечивающих малую величину джиттера и малый выброс на переходной характеристике. Для расширения функциональных возможностей устройства в схеме использованы интегральные линии задержки.

**Цифровое кодирование информации.** При передаче цифровой информации в виде электрических сигналов применяются коды, к которым предъявляются следующие требования:

- минимальная полоса частот цифрового сигнала, обеспечивающая возможность увеличения объема передачи данных по имеющемуся физическому каналу;
- незначительный уровень постоянного напряжения в линии передачи;
- достаточная амплитуда импульсов напряжения, обеспечивающая требуемое отношение полезного сигнала к шуму;
- регулярное, с заданной частотой, появление определенных переходов напряжения (от низкого уровня к высокому или наоборот), необходимое для обеспечения синхронизации приемника и передатчика.

Наиболее простой алгоритм кодирования обозначается NRZ (Non Return to Zero – без возврата к нулю) и служит базой для построения более совершенных алгоритмов [1]. Попытки преодоления проблем, связанных с передачей длительных последовательностей «единиц» без повышения требований к полосе пропускания канала связи, привели к разработке кода, обозначаемого NRZI (NRZ-Inverted – с инверсией) или NRZM (NRZ-Mark – с пометкой). Этот метод кодирования использует NRZ-код в качестве исходной информации и производит побитное преобразование данных в соответствии с алгоритмом [1]:

© В.П.Тимошенков, В.А.Братов, 2008

- логический «ноль» на входе вызывает повторение предшествующего значения выходного напряжения, т.е. кодируется отсутствием перехода в начале бита;

- логическая «единица» на входе вызывает изменение выходного напряжения от низкого уровня до высокого или наоборот, т.е. кодируется наличием перехода в начале бита.

Таким образом, NRZM-код преобразует постоянный уровень «единицы» в последовательность чередующихся «нулей» и «единиц». Это приводит к эффективно-му снижению значения постоянного напряжения в линии без увеличения полосы частот сигнала.

**Особенности элементной базы на арсениде галлия.** Арсенид галлия активно используется при проектировании СВЧ ИМС. Это обусловлено высокими скоростными характеристиками активных компонентов арсенида галлия, а также хорошими изолирующими свойствами подложки. Широко используемые транзисторы с затвором Шоттки и гетеропереходные полевые транзисторы имеют хорошие скоростные характеристики, но подвержены эффекту «паразитного» управления по подложке [2]. Гетеропереходные биполярные транзисторы на основе арсенида галлия обладают более высокой передаточной проводимостью и не подвержены указанному эффекту. К их преимуществам [3–9] относятся:

- высокая верхняя граничная частота ( $F_t = 84$  ГГц) и стабильно-высокое среднее значение коэффициента передачи эмиттерного тока ( $\beta = 220$ );
- высокие пробивные напряжения ( $U_{кэ0} = 6,9$  В,  $U_{кб0} = 14$  В);
- высокое напряжение Эрли ( $>100$  В);
- малые утечки;
- повышенная стойкость к воздействию радиации.

Арсенид галлия обеспечивает также хорошие характеристики пассивных компонентов, включая высокую добротность конденсаторов и индуктивностей, а также малую паразитную емкость сигнальных шин и компонентов по отношению к подложке.

Проектирование ИМС с применением ГБТ на основе арсенида галлия имеет следующие специфические особенности.

1. Повышенное значение напряжения открытого перехода база–эмиттер  $U_{бэ0} = 1,2$  В по сравнению с обычными кремниевыми биполярными транзисторами неизбежно приводит к увеличению напряжения питания.

2. Наличие высокоомной подложки (полуизолятор с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 12\text{--}13$ ) создает условия для образования высокочастотных паразитных резонансных цепей, которые могут приводить к высокочастотному самовозбуждению схем. Примерами могут служить индуктивность шины питания в сочетании с развязывающими конденсаторами типа металл–диэлектрик–металл в цепи питания или линия связи эмиттерного повторителя с последующим блоком в сочетании с входной емкостью этого блока. Образующийся в последнем случае резонансный контур может создавать выброс на передаточной характеристике, достигающий 30–40%.

3. Низкая теплопроводность подложки препятствует компактному расположению активных компонентов, что приводит к увеличению площади схемы на кристалле и усугубляет отрицательную тенденцию, отмеченную выше.

4. Для улучшения заземления используется уменьшение толщины полуизолирующей подложки до 100–150 мкм с последующим вытравливанием сквозных окон и металлизацией ее обратной стороны. Образующиеся сквозные контакты значительно уменьшают индуктивность и сопротивление нулевой шины и способствуют эффективному отводу тепла от схемы, хотя и занимают значительную площадь.

**Структурные и электрические схемы блоков.** Структурная схема разработанного преобразователя кода приведена на рис.1. Устройство состоит из входного и выходного трактов усиления сигнала данных (ТД), блока преобразования кода и тракта синхронизации (ТС). Основными ячейками блоков ТД и ТС являются усилители Черри–Купера УЧК20мА, УЧК72мА и эмиттерные повторители Эш10мА, Эп40мА. Цифры обозначают полный статический ток, потребляемый в номинальных условиях. Электрические схемы усилителей и повторителей, а также параметры их компонентов приведены на рис.2.

Следует отметить, что наиболее критические места передачи сигнала дополнены микрополосковыми линиями, моделирующими влияние линий связи.

Схема УЧК20мА является классическим примером усилителя Черри–Купера [10], достоинствами которого являются высокое усиление и быстродействие, а также удобство регулировки глубины обратной связи посредством выбора параметров транзисторов Т1, Т7 и резисторов R1, R8. Недостатком такого усилителя является относительно высокое напряжение питания, минимальная величина которого определяется выражением

$$V_{\text{п}} = 2V_{\text{бэ0}} + \frac{V_{\text{вых}}}{2} + V_I + V_{R1},$$

где  $V_{\text{бэ0}} = 1,2 \text{ В}$  – падение напряжения на открытом переходе база–эмиттер;  $V_{\text{вых}} = 1 \text{ В}$  – размах выходного сигнала;  $V_I = 1,22 \text{ В}$  – падение напряжения на источнике тока;  $V_{R1} = 0,22 \text{ В}$  – падение напряжения на резисторе эмиттерного повторителя. Таким образом, напряжение питания составляет 5 В.

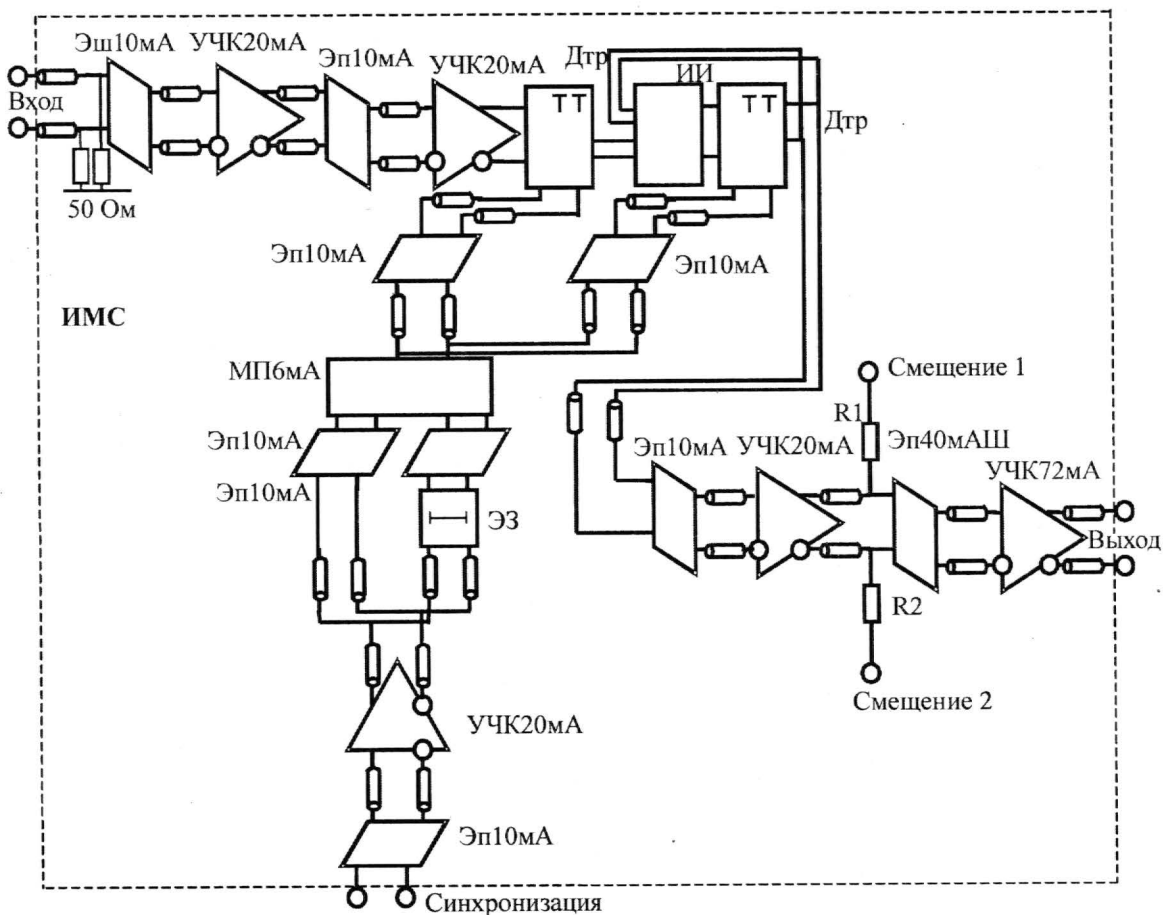
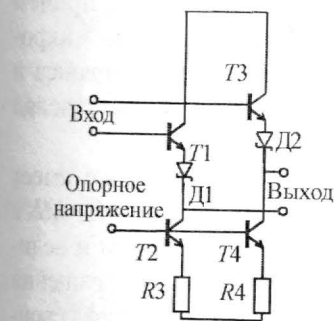
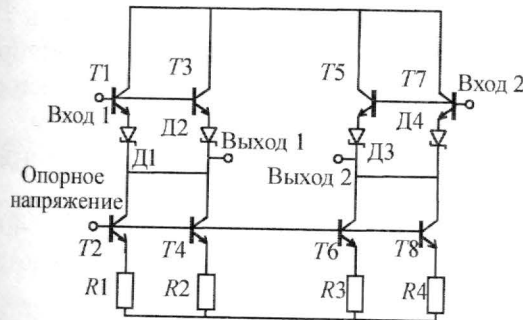


Рис.1. Структурная схема преобразователя кода

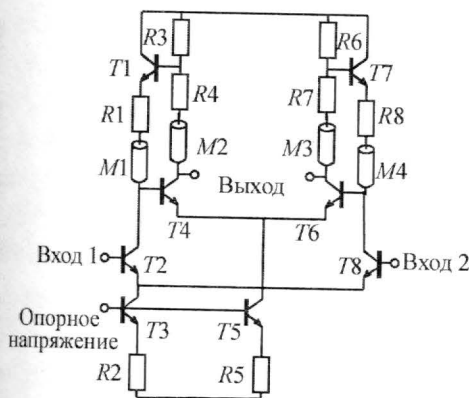


Компонент	Параметр	Схема		
		Эп5мА	Эш10мА	Эп10мА
T1...T4	Площадь эмиттера, мкм <sup>2</sup>	8,6	12,8	12,8
D1...D2	Площадь, мкм <sup>2</sup>	Нет	8,6	Нет
R1, R2	Сопротивление, Ом	100	50	50

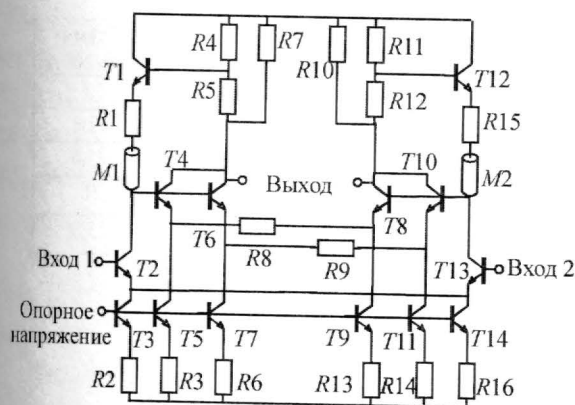


Компонент	Параметр	Схема Эш40мА
T1, T2, T7, T8	Площадь эмиттера, мкм <sup>2</sup>	25,6
T3, T4, T5, T6	Площадь эмиттера, мкм <sup>2</sup>	25,6
R1 ... R4	Сопротивление, Ом	20
D1...D4	Площадь, мкм <sup>2</sup>	32

а



Компонент	Параметр	Схема УЧК20мА
T1, T2, T7, T8 T4, T6	Площадь эмиттера, мкм <sup>2</sup>	12,8
T3, T5	Площадь эмиттера, мкм <sup>2</sup>	25,6
R1, R8	Сопротивление, Ом	40,6
R2, R5	Сопротивление, Ом	20,3
R3, R6, R4, R7	Сопротивление, Ом	25,6
M1, M4	Индуктивность, пГн	75
M2, M3	Индуктивность, пГн	150



Компонент	Параметр	Схема УЧК72мА
T1...T14	Площадь эмиттера, мкм <sup>2</sup>	25,6
R1, R15	Сопротивление, Ом	23,1
R2, R3, R6, R13, R14, R16	Сопротивление, Ом	18,3
R4, R11	Сопротивление, Ом	50,6
R5, R12	Сопротивление, Ом	80,6
R7, R10	Сопротивление, Ом	96,2
R8, R9	Сопротивление, Ом	25,6
M1, M2	Индуктивность, пГн	75

б

Рис.2. Электрические схемы блоков: а – эмиттерные повторители; б – усилители Черри–Купера

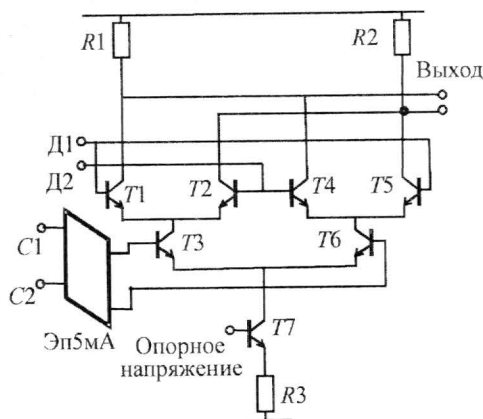


Полоса пропускания усилителя расширена за счет индуктивной коррекции, причем корректирующие индуктивности  $M2$ ,  $M3$  и  $M1$ ,  $M4$  выполнены в виде коротких микрополосковых линий с высоким волновым сопротивлением 120 Ом. Расчет импеданса и длины линий осуществлялся таким образом, чтобы на частоте 10 ГГц присутствовал подъем амплитудно частотной характеристики в пределах 10–15%.

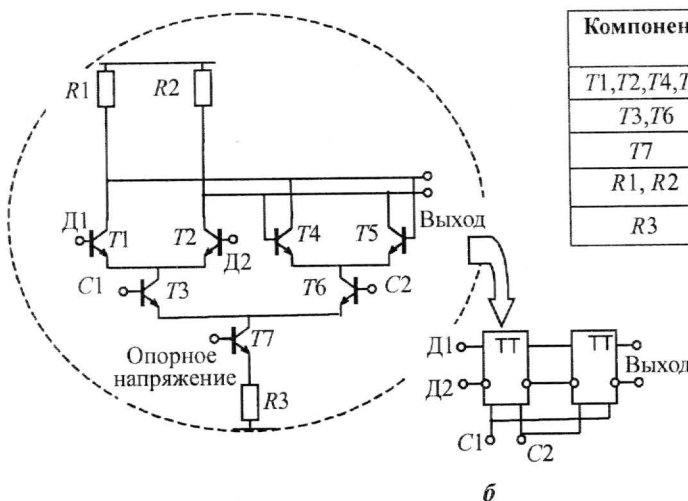
Выходной усилитель УЧК72мА, построенный по схеме Черри–Купера, также имеет расширенную полосу пропускания за счет введения микрополосковых линий  $M1$ ,  $M2$  с импедансом 120 Ом. Усилитель оптимизирован по величине выходного джиттера и величине перерегулирования передаточной характеристики. Кроме того, для предотвращения температурного перегрева введено разделение источника тока внутреннего дифференциального каскада на четыре отдельных источника тока, попарно в левой ( $T5$ ,  $R3$  и  $T7$ ,  $R6$ ) и правой ( $T9$ ,  $R13$  и  $T11$ ,  $R14$ ) частях. Выходная нагрузка комбинированная. Резисторы  $R4$ ,  $R5$  и  $R11$ ,  $R12$  обеспечивают режим внутренних эмиттерных повторителей, а резисторы  $R7$  и  $R10$  корректируют величину нагрузки с целью получения точного значения 50 Ом.

Важным параметром устройства является чувствительность. Для расчета чувствительности следует принять во внимание следующее:

- логические элементы Д-триггера (рис.3) имеют логические уровни  $V_L = 400$  мВ. Коэффициент усиления логических элементов Д-триггера рассчитывается в соответствии с выражением:  $A_D = \frac{I_{R3} R1}{2\phi_T} \cong 5$ , где  $\phi_T = 25$  мВ – термодинамический потенциал;



Компонент	Параметр	Схема ИИ
$T1, T2, T4, T5$	Площадь эмиттера, мкм <sup>2</sup>	8,6
$T3, T6$	Площадь эмиттера, мкм <sup>2</sup>	8,6
$T7$	Площадь эмиттера, мкм <sup>2</sup>	12,8
$R1, R2$	Сопротивление, Ом	50
$R3$	Сопротивление, Ом	50



Компонент	Параметр	Схема УЧК20мА
$T1, T2, T4, T5$	Площадь эмиттера, мкм <sup>2</sup>	8,6
$T3, T6$	Площадь эмиттера, мкм <sup>2</sup>	12,8
$T7$	Площадь эмиттера, мкм <sup>2</sup>	25,6
$R1, R2$	Сопротивление, Ом	36
$R3$	Сопротивление, Ом	25,6

Рис.3. Электрические схемы: а – «исключающее ИЛИ»; б – Д-триггер

- коэффициент передачи двух эмиттерных повторителей  $A_{э.п} = \frac{I_{э.п} R / \varphi_T}{1 + I_{э.п} R / \varphi_T} \cong 0,94 - 0,95$ ;

- усиление ячейки Черри-Купера (см. рис.2,а) равно  $A_V = \frac{A_{V0}}{1 + A_{V0} R3(R3 + R4)^{-1} A_{э.п}} \cong 2$ ,

где  $A_{V0} = \frac{I_{R2} R1 I_{R5} (R3 + R4)}{2\varphi_T 2\varphi_T} \cong 97$ .

Таким образом, чувствительность устройства:  $S = \frac{V_L}{A_D A_V A_{э.п}} \cong 15 - 16 \text{ мВ}$ .

Для обеспечения размаха выходного напряжения  $V_{\text{вых}} = 1 \text{ В}$  на внешней нагрузке  $R_{\text{ext}} = 50 \text{ Ом}$ , через выходной дифференциальный каскад необходимо переключать ток, определяемый выражением:

$$I_0 = \frac{V_{\text{вых}}}{R_{\text{ext}} + R_{\text{вх}}} = 40 \text{ мА, где } R_{\text{вх}} = \frac{(R4 + R5)R7}{R4 + R5 + R7} = \frac{(R11 + R12)R10}{R11 + R12 + R10} = 50 \text{ Ом}.$$

Таким образом, минимальный ток через каждый из резисторов  $R3, R6, R13, R14$  должен составлять  $10 \text{ мА}$ .

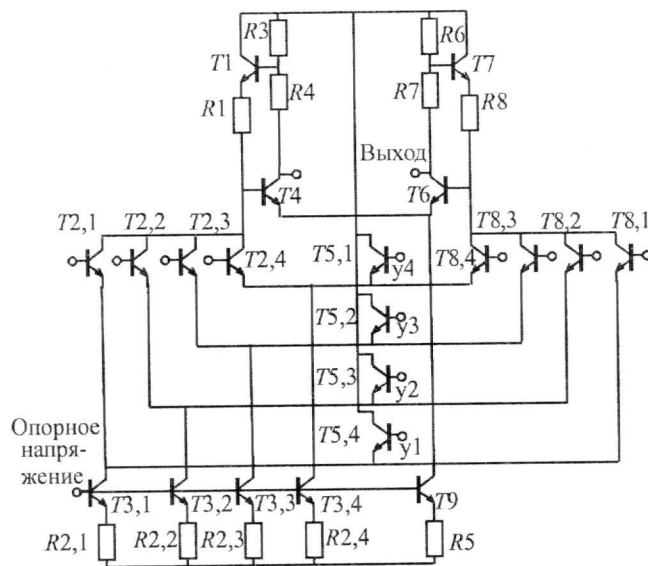
В схеме предусмотрена возможность компенсации напряжения смещения выходного усилителя УЧК72мА. Она осуществляется за счет подачи внешнего напряжения соответствующей полярности через резисторы  $R1/R2$  на входы эмиттерного повторителя Эп40мА, формирующего входной сигнал для усилителя УЧК72мА (см. рис.1).

Собственно преобразование NRZ кода в NRZM осуществляется с помощью ячейки «исключающее ИЛИ» и Д-триггера, выполненных в виде двухуровневых токовых ключей (CML – current-mode logic). Правильный алгоритм преобразования обеспечивается введением обратной связи с выхода Д-триггера на входы верхнего уровня ячейки «исключающее ИЛИ». Электрические схема обеих ячеек и параметры их компонентов приведены на рис.3.

Тракт синхронизации, приведенный на рис.1, представляет собой усилитель тактового сигнала с возможностью ступенчатого регулирования фазы с шагом  $90^\circ$ . Усиленная часть содержит ячейки УЧК20мА и Эш10мА. Блок выбора фазы содержит коммутатор-мультиплексор 4:1, выполненный по схеме Черри-Купера (МП6мА), и управляющий дешифратор. В зависимости от внешних управляющих сигналов мультиплексор выдает на выход следующие сигналы: прямой тактовый сигнал (фаза  $0^\circ$ ); тактовый сигнал, задержанный на  $1/4$  периода (фаза  $90^\circ$ ); инверсный тактовый сигнал (фаза  $180^\circ$ ); инверсный задержанный тактовый сигнал (фаза  $270^\circ$ ).

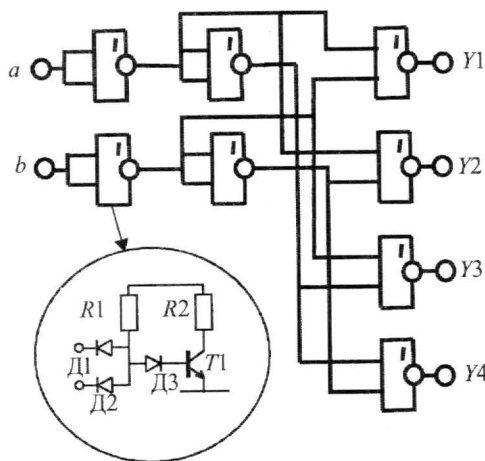
Задержка тактового сигнала обеспечивается прецизионным элементом задержки (ЭЗ) в виде связанных дифференциальных копланарных линий передачи. Электрические схемы мультиплексора и дешифратора приведены на рис.4.

Выходной тактовый сигнал с заданной фазой осуществляет синхронизацию данных при помощи Д-триггера, идентичного приведенному на рис.3. Тракт синхронизации и входная часть тракта данных построены из однотипных блоков, что обеспечивает одинаковые температурные вариации задержек в этих цепях.



Компонент	Параметр	Схема МП6мА
T1,T4, T6,T7 T3,1...T3,4	Площадь эмиттера, мкм <sup>2</sup>	8,6
T2,1...T2,4 T5,1...T5,4 T8,1...T8,4	Площадь эмиттера, мкм <sup>2</sup>	4,5
T9	Площадь эмиттера, мкм <sup>2</sup>	12,8
R1, R8	Сопротивление, Ом	10,6
R2,1...R2,4	Сопротивление, Ом	100
R5	Сопротивление, Ом	50
R3, R6, R4, R7	Сопротивление, Ом	200

a



Компонент	Параметр	ДШ2_4
T1	Площадь эмиттера, мкм <sup>2</sup>	4,5
R1, R2	Сопротивление, Ом	1000
Д1...Д3	Площадь, мкм <sup>2</sup>	4

b

Рис.4. Электрические схемы цепи синхронизации: а – мультиплексор; б – дешифратор

**Топологическое проектирование.** Топологическое проектирование преобразователя кодов выполнено на основе арсенидгалиевого технологического процесса , который позволяет создавать высокоскоростные ( $F_t = 84$  ГГц) гетеропереходные биполярные транзисторы с высокими значениями коэффициента усиления по току ( $\beta = 220$ ), диоды Шотки, пленочные резисторы и конденсаторы типа металл–диэлектрик–металл. Процесс имеет два уровня металлической разводки, металлизацию на обратной стороне подложки и сквозные окна. Эти окна использованы во входных и выходных каскадах для улучшения заземления и рассеивания тепла.

Тракт синхронизации топологически расположен перпендикулярно к тракту данных, что позволяет существенно уменьшить взаимные наводки.

Элемент задержки выполнен в первом уровне металлизации в виде связанных копланарных линий с дифференциальным сопротивлением 100 Ом. Обе боковые «земляные» шины копланарной линии соединены с металлизированной обратной стороной подложки через сквозные окна большого диаметра (200 мкм). Кроме того, они дополнительно объединяются между собой через каждые 300 мкм с помощью перемычек во втором уровне металлизации.

Полный топологический рисунок кристалла приведен на рис.5. Разработанный кристалл имеет размер  $1,8 \times 1,8$  мм. С целью улучшения согласования и уменьшения взаимных наводок для внешних выводов данных и тактового сигнала применена конфигурация «земля–сигнал–земля–сигнал–земля».

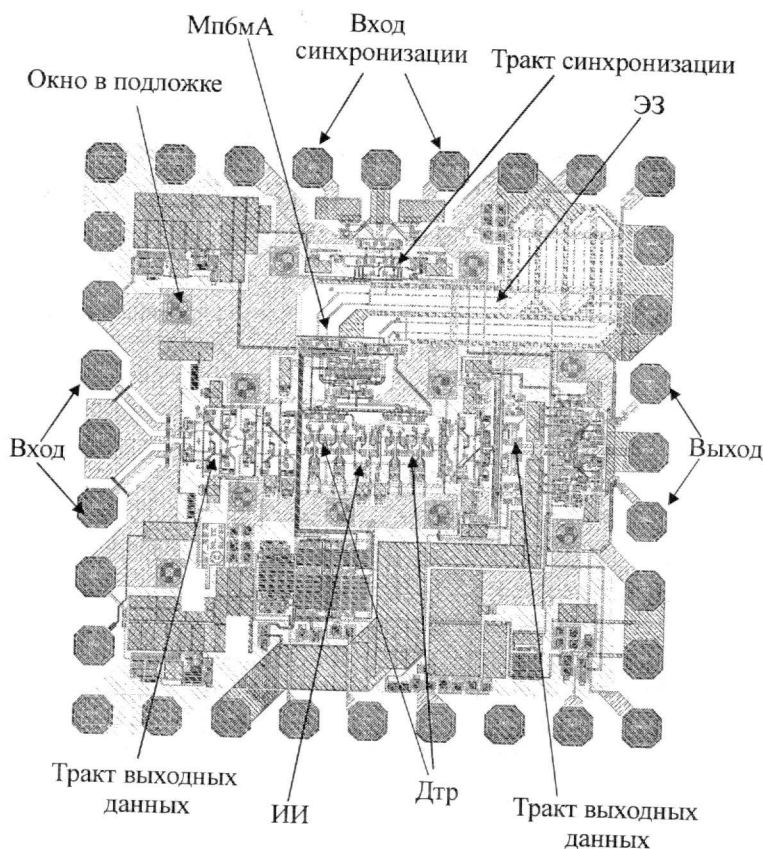


Рис. 5. Топология преобразователя кода

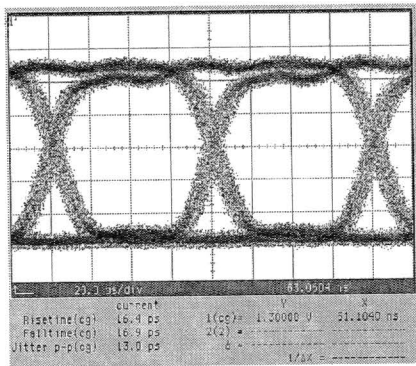
**Экспериментальные исследования.** Исследования функционирования кристаллов преобразователя кода проводились с использованием высокочастотной зондовой установки, содержащей сигнальные СВЧ-зонды с полосой пропускания до 40 ГГц и низкочастотные зонды для подведения контрольных и питающих напряжений. В качестве входного сигнала использовалась псевдослучайная последовательность цифровых импульсов с периодом повторения  $2^7-1$  бит, скоростью 12,5 Гбит/с и амплитудой 100 мВ. Для регистрации выходных сигналов применялся цифровой осциллограф Agilent 83752A со стробоскопическим блоком 86109A. Измеренные значения собственного джиттера осциллографа и генератора псевдослучайной последовательности составили 5 и 9 пс соответственно.

На рис.6 приведены экспериментальные и расчетные диаграммы выходного сигнала, нагруженного на 50-омную линию. Измеренные значения амплитуды, длительности фронтов и джиттера показывают высокую степень совпадения с расчетными значениями.

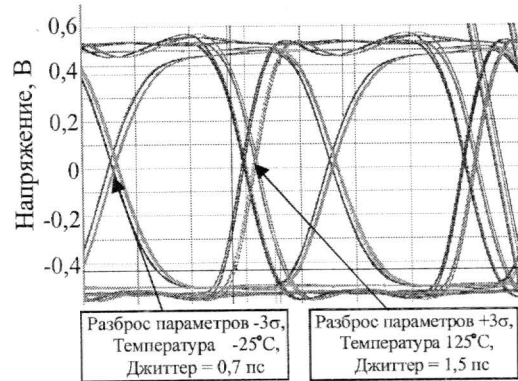
Результаты проверки функционирования блока выбора фазы подтвердили его полную работоспособность и высокую эффективность. Точная привязка фазы, определяемая электрической длиной связанной копланарной линии, обеспечила температурное рассогласование сигнала синхронизации и данных в пределах 2 пс.

Гетеропереходные биполярные транзисторы на арсениде галлия являются перспективной элементной базой для создания высокоскоростных устройств передачи информации. Использование указанной элементной базы для разработки преобразователя кода NRZ в NRZM обеспечило скорость передачи данных не менее 12,5 Гбит/с.





а



б

Рис.6. Экспериментальные исследования (а) и компьютерное моделирование (б) «глаз-диаграммы» преобразователя кода

Применение коротких микрополосковых линий с высоким волновым сопротивлением позволяет расширить полосу пропускания (время нарастания переходной характеристики 16,4 пс) и достичь величины джиттера, не превышающей 13 пс, при амплитуде дифференциального выходного сигнала 1 В на 50-омной нагрузке.

Использование встроенной линии задержки на основе связанной копланарной линии обеспечивает возможность регулировки фазы синхронизирующих тактовых импульсов с шагом 90° и точностью в пределах 2 пс.

### Литература

1. *DeAndrea J.* NRZ-to\_RZ Conversion for Metro Design. – [http:// www.commsdesign.com/design\\_center/opticalnetworking/design\\_corner/showArticle](http://www.commsdesign.com/design_center/opticalnetworking/design_corner/showArticle).
2. *Тимошенков В.П., Хлыбов А.И.* Влияние потенциала подложки на статические и динамические характеристики ИМС на арсениде галлия // Вопросы технологии изготовления и проектирования ИМС памяти: Сб. науч. тр. / Под ред. М.А.Королева. – М.: МИЭТ, 1986. – С. 38–46.
3. *Pan N., Elliott J., Knowles M., Vu D.P.* High reliability InGaP/GaAs HBT // IEEE Electron Device Letters. – 1998. – Vol. 19, Issue: 4, Apr. – P. 115–117.
4. Reliability of AlGaAs and InGaP heterojunction bipolar transistors / *N.Pan, R.E.Welser, C.R.Lutz et al.* // IEICE Trans. Electron. – 1999. – Vol. E82-C, N.11, Nov.
5. *Adlerstein M.G., Gering, J.M.* Current induced degradation in GaAs HBT's // Electron Devices, IEEE Transactions on ED. – 2000. – Vol. 47, Iss.2, Feb. – P. 434–439.
6. *Oka T., Hirata K., Takazawa H., Ohbu I.* Characterization of InGaP/GaAs HBTs under Temperature and current stress // GaAs MANTECH Digest. – 2000. – P. 137–140.
7. *Surridge R., Law J., Oliver B. et al.* Nortel networks optical components, Accelerated Reliability Testing of GaAs/InGaP HBTs // GaAs MANTECH Digest. – 2002.
8. A low power 72.8 GHz static frequency divider implemented in AlInAs/InGaAs HBT IC technology / *M.Sokolich, C.Fields, B.Shi, et al.* // GaAs IC Symp. Dig. (Seattle, WA, Nov. 5–8, 2000). – 2000. – P. 81–84.
9. Implementation of reduced turn-on voltage InGaP HBTs using graded GaInAsN base regions / *P.M.DeLuca, C.R.Lutz, R.E.Welser et al.* // IEEE electron device letters. – 2002. – Vol. 23, N 10, Oct. – P. 81–84.
10. *Cherry E.M., Hooper D.E.* The design of wide-band transistor feedback amplifiers // Proc. IEEE. – 1963. – Vol. 110, Feb. – P. 375–389.

Статья поступила 16 апреля 2007 г.

**Тимошенков Валерий Петрович** – кандидат технических наук, докторант кафедры интегральной электроники и микросистем МИЭТ. Область научных интересов: проектирование СВЧ-интегральных ИМС, телекоммуникация, СВЧ-радиосвязь.

**Братов Владимир Алиевич** – кандидат технических наук, вице-президент компании «Advanced science and novel technology». Область научных интересов: проектирование СВЧ-интегральных ИМС, телекоммуникация, СВЧ-радиосвязь.

# Расчет конструктивных параметров и электрического потенциала трехдиодной вертикально интегрированной спектрально-селективной фотоячейки

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

Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)

Проведен математический анализ вертикально интегрированной фоточувствительной ячейки, предназначенной для матричного спектрально-селективного фотоэлектрического преобразователя изображений. Исследованы конструктивные параметры и управляющие напряжения фотоячейки, а также распределения электрического потенциала. Рассчитаны поверхностные концентрации накапливаемых фотоносителей и время терморелаксации  $p$ - $n$ - $p$ -структуры фотоячейки.

Технологии интегральных приемников изображения видимого диапазона в настоящее время продолжают развиваться. Это связано с устойчивым спросом на многоспектральные детекторы для усовершенствованных систем приема изображения с улучшенными параметрами по распознаванию и идентификации цели.

Спектрозональный матричный фотоприемник фирмы Foveon на основе трех вертикально интегрированных  $p$ - $n$ -переходов является одной из удачных практических реализаций указанного класса фотоприемных матриц, обладающих сравнительно малыми по площади ( $9,12 \times 9,12$  мкм) фоточувствительными элементами разложения оптического изображения и достаточно высокой степенью их интеграции на одном кристалле –  $10,2 \cdot 10^6$  элементов с учетом разложения изображения на три оптических диапазона длин волн (синий, зеленый, красный) [1]. По своим конструктивным параметрам и фотоэлектрическим характеристикам этот фотоприемник не уступает и даже превосходит известные спектрозональные фотоэлектрические преобразователи изображений на основе приборов с зарядовой связью [2–7].

Разработка спектрозональных матричных фотоприемников высокой степени интеграции на основе вертикально совмещенных диодных структур является в настоящее время актуальной задачей. В данной работе представлены результаты детального анализа конструктивных параметров (необходимых толщин слоев структуры, концентраций легирующих примесей в них и т.п.), управляющих электрических напряжений и фотоэлектрических характеристик фоточувствительной трехдиодной ячейки спектрозонального матричного фотоприемника. Анализ выполнен на основе аналитических расчетов одномерной по толщине модели структуры фоточувствительной ячейки, а также численных расчетов на ЭВМ ее двумерной по толщине модели с помощью приборно-технологической САПР ISE TCAD швейцарской фирмы ISE.

**Аналитический расчет электрического потенциала в  $p$ - $n$ - $p$ -структуре фотоячейки.** Найдем оптимальное распределение электрического потенциала в толще полупроводниковой структуры фоточувствительной ячейки с точки зрения достаточных величин фотозарядов, накапливаемых в соответствующих областях пространственного заряда (ОПЗ) обратно смещенных  $p$ - $n$ -переходов.

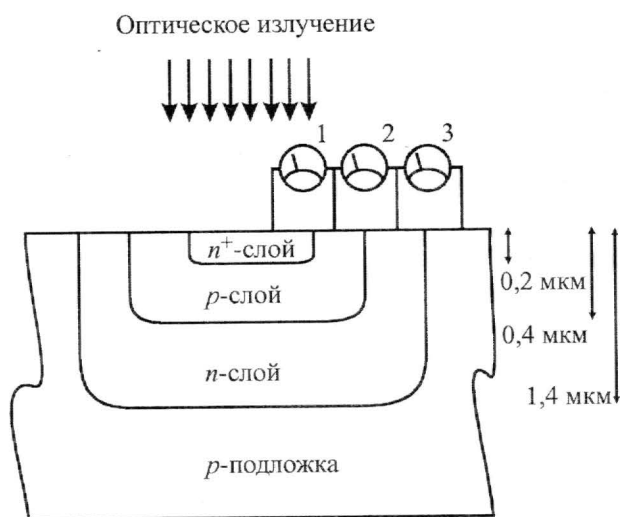


Рис.1. Схематический разрез фоточувствительной ячейки, содержащей три вертикально интегрированных  $p$ - $n$ -перехода (1, 2, 3 – источники управляющих напряжений)

На рис.1 схематически изображен поперечный вертикальный разрез кремниевой полупроводниковой структуры фоточувствительной ячейки, содержащей три  $p$ - $n$ -перехода, которые с полупроводниковой кремниевой подложкой  $p$ -типа проводимости образуют  $n$ - $p$ - $n$ - $p$ -структуру. Самый глубокий слой  $n$ -типа проводимости, выполненный непосредственно в подложке, имеет толщину  $a = 1,4$  мкм и концентрацию донорной легирующей примеси  $N_d^{(1)} = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Следующий слой  $p$ -типа имеет толщину  $b = 0,4$  мкм и концентрацию акцепторной легирующей примеси  $N_a^{(2)} = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Приповерхностный слой  $n$ -типа легирован донорной примесью концентрацией  $N_d^{(2)} = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и толщиной  $c = 0,2$  мкм. Кремниевая подложка  $p$ -типа имеет концентрацию легирующей акцепторной примеси  $N_a^{(1)} = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

Таким образом, в рассматриваемой структуре три  $p$ - $n$ -перехода, удаленные от верхней поверхности кремниевой подложки на глубину 0,2; 0,6 и 2 мкм. При освещении структуры ячейки сверху оптическим излучением указанная глубина залегания  $p$ - $n$ -переходов от поверхности подложки обеспечивает разделение образующихся фотоносителей, соответствующих разным диапазонам длин волн оптического излучения. Это является следствием зависимости коэффициента поглощения оптического излучения в кремнии от длины волны [8]. В верхнем  $n$ -слое структуры должно преимущественно поглощаться излучение в диапазоне длин волн 0,4–0,49 мкм (синий цвет), в среднем  $p$ -слое – оптическое излучение в диапазоне 0,49–0,575 мкм (зеленый цвет), в нижнем  $n$ -слое, а также частично в  $p$ -подложке – 0,575–0,70 мкм (красный цвет).

Аналитический расчет распределения электрического потенциала выполнен на основе одномерной модели, в которой рассматривается стационарное состояние обратно смещенных  $p$ - $n$ -переходов, что обеспечивается соответствующими напряжениями. При этом  $p$ - $n$ -переходы предполагаются с резкими металлургическими границами, а в их толщах существуют соответствующие ОПЗ, образованные обедненными легирующими примесями  $n$ - и  $p$ -областей. Также считается, что температура полупроводниковой кремниевой структуры достаточно высока, чтобы легирующие примеси атомов мышьяка, фосфора и бора были практически полностью ионизованы.

Следует также учесть, что в стационарном состоянии в максимуме электрического потенциала полупроводниковых  $n$ -областей структуры существуют электронейтральные области толщиной  $Q_n / N_d$ , где  $Q_n$ ,  $N_d$  – соответственно поверхностная концентрация равновесных электронов проводимости и объемная концентрация легирующей донорной примеси. В минимуме электрического потенциала  $p$ -области существует электронейтральная область, заполненная равновесными дырками проводимости, толщиной  $Q_p / N_a$ , где  $Q_p$ ,  $N_a$  – соответственно поверхностная концентрация равновесных дырок и объемная концентрация легирующей акцепторной примеси.

Через соответствующие контакты к указанным областям приложены напряжения относительно подложки: к глубокому  $n$ -слою – положительное напряжение  $V_1$ , к среднему  $p$ -слою – положительное напряжение  $V_2$  и к верхнему  $n$ -слою – положительное напряжение  $V_3$ .

На рис.2 схематически представлено стационарное распределение объемного заряда вблизи границ  $p$ - $n$ -переходов, а также указаны соответствующие электронейтральные области (их толщины) в  $n$ - и  $p$ -областях. На рис.3 изображено качественное распределение электрического потенциала в рассматриваемой  $p$ - $n$ - $p$ -структуре, соответствующее стационарному распределению объемного заряда (см. рис.2). На рис.2 и рис.3 обозначены толщины  $n$ - и  $p$ -слоя, границы  $p$ - $n$ -переходов и толщины ОПЗ в них.

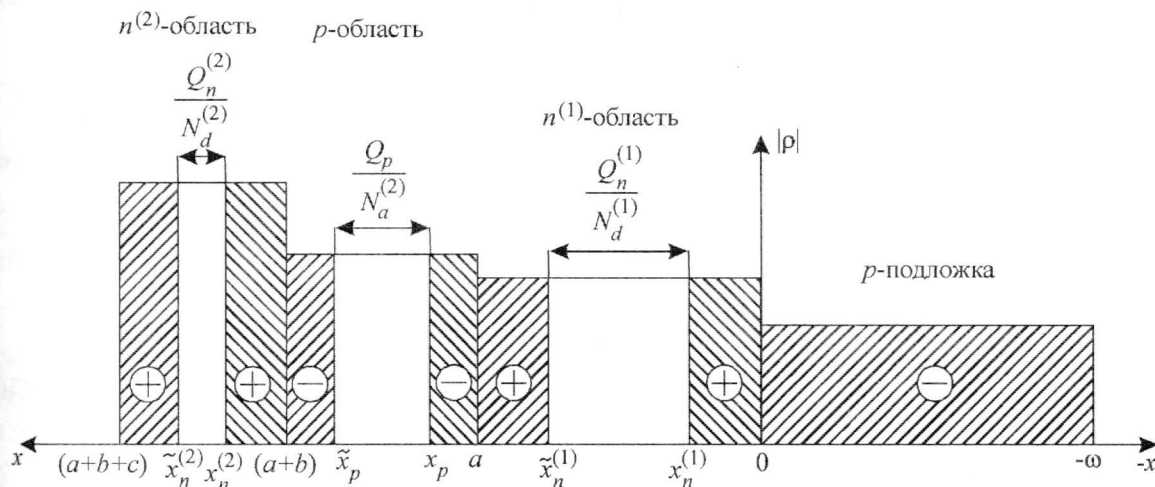


Рис.2. Схематическое распределение объемных зарядов ионизованных легирующих примесей на границах  $p$ - $n$ -переходов в стационарном состоянии

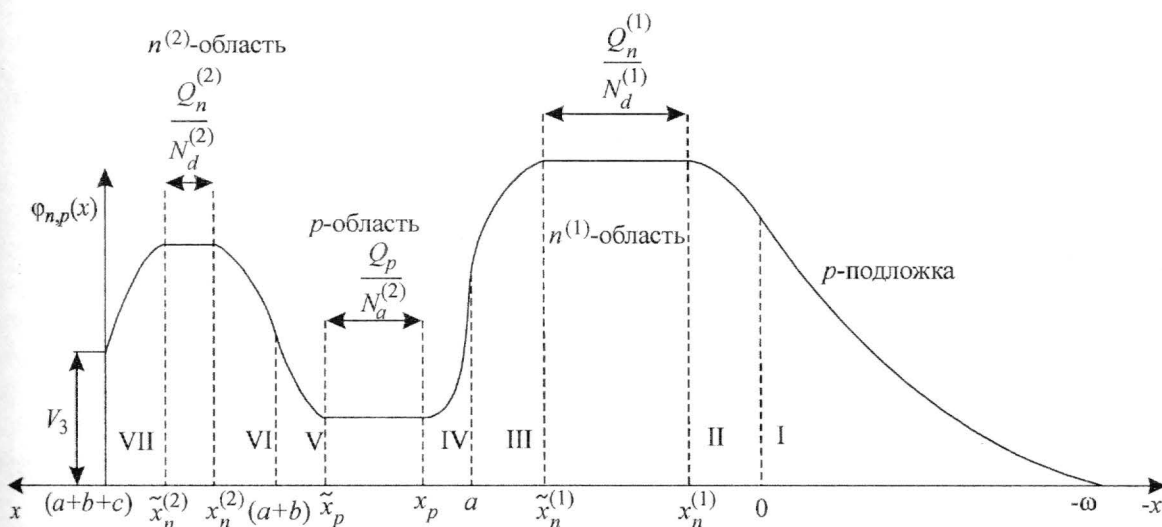


Рис.3. Качественное распределение электрического потенциала в  $p$ - $n$ - $p$ -структуре, соответствующее ОПЗ (см. рис.2)

Расчет распределения электрического потенциала выполнен в каждой  $n$ - и  $p$ -области структуры традиционным образом на основе решения уравнения Пуассона.

Для  $p$ -подложки (область I)

$$0 \geq x \geq -w$$

$$\begin{cases} \varphi_p(x) = \frac{eN_a^{(1)}}{2\varepsilon_0\varepsilon}(x+w)^2, \\ \frac{d\varphi_p(x)}{dx} = \frac{eN_d^{(1)}}{\varepsilon_0\varepsilon}(x+w). \end{cases} \quad (1)$$



Для  $n^{(1)}$ -области (глубокая):

1)  $x_n^{(1)} \geq x \geq 0$  (область II)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\varphi_n^{(1)}(x)}{dx} = \frac{eN_d^{(1)}}{\varepsilon_0\varepsilon}(\alpha \cdot w - x); \\ \varphi_n^{(1)}(x) = \varphi_{n\max}^{(1)} - \frac{eN_d^{(1)}}{2\varepsilon_0\varepsilon}(\alpha \cdot w - x)^2; \\ \varphi_{n\max}^{(1)} = \frac{eN_d^{(1)}}{2\varepsilon_0\varepsilon} \alpha(1+\alpha)w^2; \end{array} \right. \quad (2)$$

при  $x = x_n^{(1)} = \alpha w$  и  $x = \tilde{x}_n^{(1)} = x_n^{(1)} + \left( \frac{Q_n^{(1)}}{N_d^{(1)}} \right)$ ;  $\alpha = \frac{N_a^{(1)}}{N_d^{(1)}}$ ;

2)  $a \geq x \geq \tilde{x}_n^{(1)}$  (область III)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\varphi_n^{(1)}(x)}{dx} = -\frac{eN_d^{(1)}}{\varepsilon_0\varepsilon}(x - \tilde{x}_n^{(1)}); \\ \varphi_n^{(1)}(x) = \varphi_{n\max}^{(1)} - \frac{eN_d^{(1)}}{2\varepsilon_0\varepsilon}(x - \tilde{x}_n^{(1)})^2. \end{array} \right. \quad (3)$$

Для  $p$ -области (средняя):

1)  $x_p \geq x \geq a$  (область IV)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\varphi_p(x)}{dx} = -\frac{eN_a^{(2)}}{\varepsilon_0\varepsilon}(x_p - x); \\ \varphi_p(x) = \varphi_{p\min} + \frac{eN_a^{(2)}}{2\varepsilon_0\varepsilon}(x_p - x)^2; \\ \varphi_{p\min} = \varphi_{n\min}^{(1)} - \frac{eN_a^{(2)}}{2\varepsilon_0\varepsilon} \left[ \beta(\beta+1)(a - \tilde{x}_n^{(1)})^2 \right]; \end{array} \right. \quad (4)$$

при  $x = x_p$  и  $x = \tilde{x}_p = x_p + \left( \frac{Q_p}{N_a^{(2)}} \right)$ ;  $x_p = \alpha + \beta(a - \tilde{x}_n^{(1)})$ ;  $\beta = \frac{N_d^{(1)}}{N_a^{(2)}}$ ;

2)  $a+b \geq x \geq \tilde{x}_p$  (область V)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\varphi_p(x)}{dx} = \frac{eN_a^{(2)}}{\varepsilon_0\varepsilon}(x - \tilde{x}_p); \\ \varphi_p(x) = \varphi_{p\min} + \frac{eN_a^{(2)}}{2\varepsilon_0\varepsilon}(x - \tilde{x}_p)^2. \end{array} \right. \quad (5)$$

Для  $n^{(2)}$ -области (приповерхностная):

1)  $x_n^{(2)} \geq x \geq (a+b)$  (область VI)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\varphi_n^{(2)}(x)}{dx} = \frac{eN_d^{(2)}}{\varepsilon_0\varepsilon}(x_n^{(2)} - x); \\ \varphi_n^{(2)}(x) = \varphi_{n\max}^{(2)} - \frac{eN_d^{(2)}}{2\varepsilon_0\varepsilon}(x_n^{(2)} - x)^2; \\ \varphi_{n\max}^{(2)} = \varphi_{p\min} + \frac{eN_d^{(2)}}{2\varepsilon_0\varepsilon} \cdot (\gamma+1) \left[ (a+b) - \tilde{x}_p \right]^2, \end{array} \right. \quad (6)$$

где  $x_n^{(2)} = (a+b) + \gamma[(a+b) - \tilde{x}_p]$ ;  $\gamma = \frac{N_a^{(2)}}{N_d^{(2)}}$ ;

2)  $(a+b+c) \geq x \geq \tilde{x}_n^{(2)}$  (область VII)

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_n^{(2)}(x)}{dx} = -\frac{eN_d^{(2)}}{\varepsilon_0\varepsilon}(x - \tilde{x}_n^{(2)}); \\ \varphi_n^{(2)}(x) = \varphi_{n\max}^{(2)} - \frac{eN_d^{(2)}}{2\varepsilon_0\varepsilon}(x - \tilde{x}_n^{(2)})^2; \end{cases} \quad (7)$$

при  $x = (a+b+c) = \tilde{x}_n^{(2)} = x_n^{(2)} + \left(\frac{Q_n^{(2)}}{N_d^{(2)}}\right)$ ;  $\varphi_{n\max}^{(2)} = V_3$  – внешнее напряжение на  $n^{(2)}$ -области в режиме

обеднения. Следовательно,  $\frac{Q_n^{(2)}}{N_d^{(2)}} = (a+b+c) - x_n^{(2)}$ .

**Выбор конструктивных параметров и значений управляющих напряжений.** Как отмечалось, толщины полупроводниковых  $n$ - и  $p$ -областей фоточувствительной ячейки выбираются из соображений разделения в ней оптического излучения на синий, зеленый и красный. Концентрация легирующих примесей в этих областях определяется прежде всего технологическими процессами изготовления фотоячейки по традиционной КМОП-технологии, а также конечными параметрами возникающих диодных структур. Для этого на стандартной кремниевой подложке  $p$ -типа последовательно формируются области  $n$ - и  $p$ -типа путем ионной имплантации ионов фосфора (для области  $n$ -типа) и бора (для области  $p$ -типа), а затем температурного отжига и разгонки этих примесей. При этом конструктивно получаем области, вложенные одна в другую. Приповерхностная (мелкая) область  $n$ -типа создается в  $p$ -области имплантацией мышьяка, атомы которого обладают в кремнии наименьшим коэффициентом диффузии при высокой температуре отжига примеси. В результате указанных технологических процессов создаются необходимые глубины залегания  $p$ - $n$ -переходов от поверхности кремниевой подложки. При этом в силу последовательного формирования  $n$ - и  $p$ -областей должна осуществляться перекомпенсация последующей легирующей примесью типа проводимости предыдущей. Как показало численное моделирование с помощью ЭВМ потенциального профиля рассматриваемой  $p$ - $n$ - $p$ -структуры, значения управляющих напряжений, подаваемых на  $n$ - и  $p$ -области относительно  $p$ -подложки, в оптимальном случае должны быть выбраны равными: на глубокой  $n$ -области  $V_1 = +3,0$  В; на средней  $p$ -области  $V_2 = +1,0$  В и на верхней  $n$ -области  $V_3 = +3,0$  В. При этом возникают необходимые по глубине «потенциальные ямы» в  $n$ - и  $p$ -областях для накопления и удержания достаточных по величинам поверхностных концентраций фотоэлектронов и фотодырок.

На рис.4 представлены распределения электрического потенциала в рассматриваемой вертикальной трехдиодной фотоячейке, рассчитанные на ЭВМ в случае номинальных напряжений смещения

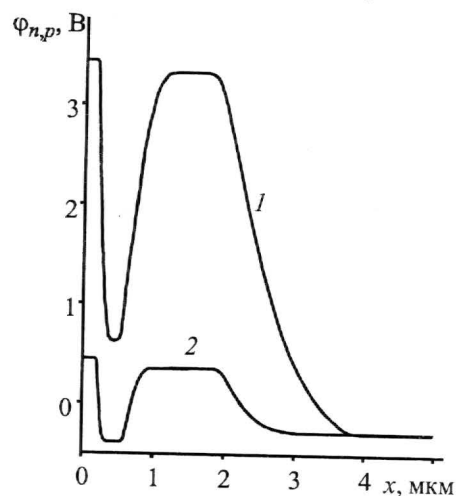


Рис.4. Распределение электрического потенциала в трехдиодной вертикальной фотоячейке при  $T = 300$  К: 1 – начальное стационарное состояние, управляющие напряжения равны:  $V_1 = V_3 = +3,0$  В;  $V_2 = +1,0$  В; 2 – равновесное состояние, соответствующие управляющие напряжения равны:  $V_1 = V_2 = V_3 = 0$

$p$ - $n$ -переходов и нулевых напряжений. Для выбранных напряжений управления внутренние поля ОПЗ  $p$ - $n$ -переходов в несколько раз меньше критического поля электрического пробоя.

Анализ показал, что эти распределения электрического потенциала в точности соответствуют аналитическим соотношениям (1)–(7) и следуют из них. С помощью указанных соотношений можно рассчитать максимально допустимые поверхностные концентрации фотоносителей, накапливаемые и удерживаемые в соответствующих «потенциальных ямах»  $n$ - и  $p$ -областей, не прибегая к численным расчетам на ЭВМ. Затем, исходя из значений скоростей генерации темновых токов электронов и дырок в структуре и допустимого соответствующего времени фоторелаксации «потенциальных ям», можно рассчитать значение динамического диапазона работы фотоячейки как фотоприемника (для заданной его температуры).

**Расчет величин поверхностных концентраций накапливаемых фотоносителей и времени терморелаксации структуры фотоячейки.** Учитывая, что заполнение «потенциальных ям» фотоносителями  $n$ - и  $p$ -областей ограничивается их переполнением, разности потенциалов на обратносмещенных  $p$ - $n$ -переходах не должны быть меньше контактных разностей потенциалов. Исходя из указанных ограничений, рассчитаны величины максимальных фотозарядов, накапливаемых в  $n$ - и  $p$ -областях. Для каждой области выполняется следующее соотношение:

$$\Delta Q_{n,p \text{ фот}}^{(1,2)} = Q_{n,p \text{ max}}^{(1,2)} - Q_{n,p \text{ min}}^{(1,2)}, \quad (8)$$

где  $\Delta Q_{n,p \text{ фот}}^{(1,2)}$  – поверхностная концентрация накопленных фотозарядов;  $Q_{n,p \text{ max}}^{(1,2)}$ ,  $Q_{n,p \text{ min}}^{(1,2)}$  – максимальная и минимальная поверхностная концентрация в заполненной и пустой «потенциальной яме».

Для глубокой  $n$ -области получено выражение для начальной поверхностной концентрации темновых электронов:

$$Q_{n \text{ min}}^{(1)} = N_d^{(1)} \left[ a - \left( \alpha w_1 + \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon(V_1 - V_2 + \varphi_2)}{eN_d^{(1)}(\beta + 1)}} \right) \right],$$

а также найдено предельное значение поверхностной концентрации электронов для этой области:

$$Q_{n \text{ max}}^{(1)} \leq N_d^{(1)} \left[ a - \left( \alpha w_2 + \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon\varphi_2}{eN_d^{(1)}(\beta + 1)}} \right) \right],$$

где  $w_1 = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon(V_1 + \varphi_1)}{eN_a^{(1)}(1 + \alpha)}}$ ,  $w_2 = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon\varphi_1}{eN_a^{(1)}(1 + \alpha)}}$  – выражения для толщин ОПЗ в  $p$ -подложке

в случаях начального состояния структуры (в темноте) и в заполненном фотоносителями состоянии при ее освещении соответственно.

Начальная поверхностная концентрация темновых дырок в  $p$ -области:

$$Q_{p \text{ min}} = N_a^{(2)} \left\{ b - \left[ \beta \left( a - \left( \alpha w_1 + \frac{Q_{n \text{ min}}^{(1)}}{N_d^{(1)}} \right) \right) + \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon(V_3 - V_2 + \varphi_3)}{eN_a^{(2)}(\gamma + 1)}} \right] \right\},$$

для наибольшей поверхностной концентрации дырок в  $p$ -области в режиме освещения:

$$Q_{p \max} \leq N_a^{(2)} \left\{ b - \left[ \beta \left( a - \left( \alpha w_2 + \frac{Q_n^{(1) \max}}{N_d^{(1)}} \right) \right) + \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon \Phi_3}{e N_a^{(2)} (\gamma + 1)}} \right] \right\}.$$

Выражение для концентрации электронов в приповерхностном  $n$ -слое имеет вид

$$Q_n^{(2)} \leq N_d^{(2)} \left\{ c - \gamma \cdot \left[ b - \frac{Q_p}{N_a^{(2)}} - \beta \cdot \left( a - \left( \alpha \cdot w + \frac{Q_n^{(1)}}{N_d^{(1)}} \right) \right) \right] \right\}.$$

Подставляя основные конструктивные значения согласно (8), имеем: для глубокой  $n$ -области –  $\Delta Q_{n \text{ фот}}^{(1)} = 4,36 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ; для средней  $p$ -области –  $\Delta Q_{p \text{ фот}} = 1,12 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ; для приповерхностной  $n$ -области –  $\Delta Q_{n \text{ фот}}^{(2)} = 7,9 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ .

Исходя из полученных величин поверхностных концентраций фотоносителей, можно оценить время терморелаксации в каждой  $n$ - и  $p$ -области:

$$T_{\text{терм}}^{(n,p)} = \frac{e \cdot \Delta Q_{n,p \text{ фот}}^{(1,2)}}{j_{\text{терм}}^{(n,p)}}. \quad (9)$$

Максимальные значения токов термогенерации, входящих в соотношение (9), получены в результате численных расчетов на ЭВМ: для глубокой  $n$ -области  $j_{\text{терм}}^{(n1)} = 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ А/см}^2$ , для  $p$ -области  $j_{\text{терм}}^{(p)} = 15 \cdot 10^{-6} \text{ А/см}^2$  и для приповерхностной  $n$ -области  $j_{\text{терм}}^{(n2)} = 5,2 \cdot 10^{-6} \text{ А/см}^2$ . Подставив в (9) эти значения токов термогенерации носителей и значения максимальных величин накапливаемых концентраций фотоносителей, получим соответствующие значения времени терморелаксации «потенциальных ям»:  $T_{\text{терм}}^{(n1)} = 0,033 \text{ с}$ ,  $T_{\text{терм}}^{(p)} = 0,012 \text{ с}$  и  $T_{\text{терм}}^{(n2)} = 0,024 \text{ с}$ . Из физических соображений в качестве времени терморелаксации всей структуры фотоячейки следует выбрать наименьшее:  $T_{\text{терм}} = 0,012 \text{ с}$ . Тогда время основного цикла управления фотоячейкой электрическими напряжениями выберем в 1000 раз меньше времени терморелаксации:  $T_{\text{цикл}} = 0,001 T_{\text{терм}} = 12 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ . При этом основная тактовая частота цикла управления фотоячейкой равна:  $f_{\text{цикл}} = \frac{1}{T_{\text{цикл}}} \approx 83 \text{ кГц}$ . В реальности из-за наличия множественных

дефектов кристаллической структуры  $n$ - и  $p$ -областей фотоячейки время терморелаксации может быть меньше в несколько раз. Тогда соответствующая частота цикла управления фотоячейкой может составлять  $\sim 200\text{--}300 \text{ кГц}$ .

В результате математического анализа и численного моделирования на ЭВМ конструктивных параметров и вариации величин управляющих напряжений для трехдиодной вертикально интегрированной фотоячейки установлено следующее.

Концентрации легирующих примесей в последовательно расположенных  $n$ - и  $p$ -областях должны соответственно составлять: в глубокой  $n$ -области  $N_d^{(1)} = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ; в  $p$ -области  $N_a^{(2)} = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ; в приповерхностной  $n$ -области  $N_d^{(2)} = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  при концентрации легирующей примеси в  $p$ -подложке  $N_a^{(1)} = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Толщины указанных областей соответственно равны 1,4; 0,4 и 0,2 мкм.



Оптимальные величины управляющих (обедняющих) напряжений, приложенных относительно подложки, равны для  $n$ -областей  $V_1 = V_3 = +3$  В, для  $p$ -области  $V_2 = +1$  В, что создает необходимый рельеф электрического потенциала в указанной  $p$ - $n$ - $p$ -структуре и накопление в соответствующих «потенциальных ямах»  $n$ - и  $p$ -областей фотоносителей с поверхностными концентрациями соответственно: в глубокой  $n$ -области —  $\Delta Q_{n\text{ фот}}^{(1)} = 4,36 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , в средней  $p$ -области —  $\Delta Q_{p\text{ фот}} = 1,12 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , в приповерхностной  $n$ -области —  $\Delta Q_{n\text{ фот}}^{(2)} = 7,9 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ .

Общее время терморелаксации трехдиодной структуры приблизительно равно 12 мс и определяет номинальную частоту управления работой фотоячейки, приблизительно равную 80–100 кГц.

### Литература

1. Pat. № 5,969,875 US, Int.Cl. G01J 3/50, U.S.Cl. 250/226. Color separation in an active pixel cell imaging array using a triple-well-structure / **R.B Merrill**. — 1999.
2. **Barsan R.** Characteristics of the overlaid charge-coupled device // IEEE Transactions on Electron Devices. — 1979. — Vol. ED-26, № 2. — P. 123–131.
3. **Khainovskii V.I., Uzдовский 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.
4. **Khainovskii V.I., Uzдовский V.V.** Photoelectrical characteristics of the spectrozonal two-channel bulk charge coupled device // Proc. 40-th Int. Symp. Opt. Eng. Inst. (San Diego, 13–14 July, California, USA. — 1995. — Vol. 2551. — P. 189–196.
5. **Khainovskii V.I., Uzдовский 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.
6. **Хайновский В.И., Уздовский В.В., Гордо Н.М.** Многофункциональные спектрально-зональные фоточувствительные объемные приборы с зарядовой связью // Изв. вузов. Электроника. — 1999. — № 3. — С. 45–51.
7. **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.
8. **Dash W.C., Newman R.** Intrinsic optical absorption in single-crystal germanium and silicon at 77 K and 300 K // Phys. Rev. — 1955. — Vol. 99, № 4, August. — P. 1151–1155.

Статья поступила  
13 сентября 2007 г.

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

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

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

# Прецизионный истоковый повторитель с малым входным током на полевых транзисторах с управляющим барьерным контактом

Н.В.Гуминов, В.И.Старосельский

Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)

Рассмотрены повторители напряжения для устройств обработки информации СВЧ-диапазона, выполненных на полевых транзисторах с управляющим барьерным контактом на основе полупроводниковых соединений  $A^{III}B^V$ . Проанализированы свойства прецизионного повторителя напряжения, обладающего чрезвычайно близким к единице коэффициентом передачи, высокой линейностью передаточной характеристики и очень малым входным током.

В измерительной технике широкое применение находят буферные повторители напряжения с высоким входным импедансом и близким к единице коэффициентом передачи. В данной работе рассматриваются повторители напряжения для устройств обработки информации СВЧ-диапазона, выполненных на полевых транзисторах с управляющим барьерным контактом на основе GaAs или других полупроводниковых соединений  $A^{III}B^V$  – полевых транзисторах с затвором Шотки (ПТШ, MESFET) или гетероструктурных полевых транзисторах (ГПТ, НЕМТ).

Для простейшего истокового повторителя (рис.1,а) коэффициент передачи, как правило, не превышает значения 0,94 ввиду сравнительно высокой выходной проводимости транзисторов. Выходная проводимость транзисторов обычно характеризуется низкой воспроизводимостью, что ведет к технологическому разбросу коэффициента передачи. Кроме того, через закрытый барьерный переход затвор–сток входного транзистора протекает обратный ток  $I_g$ .

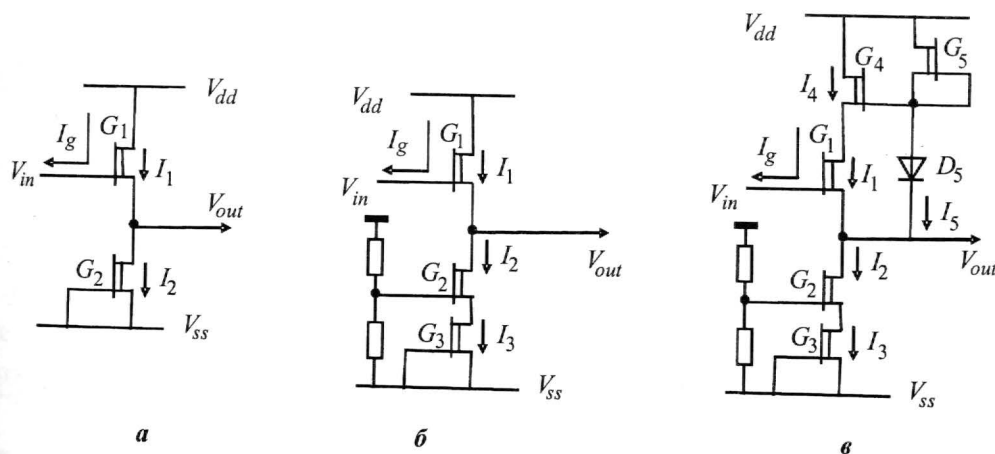


Рис.1. Истоковые повторители: а – простейший; б – с каскодной нагрузкой; в – прецизионный

В ряде случаев к повторителям напряжения предъявляются чрезвычайно высокие требования в отношении воспроизводимости и стабильности коэффициента передачи, а также входного тока. Примером могут служить устройства выборки и хранения мгновенных значений аналоговых сигналов (УВХ), которые совместно с АЦП высокой разрядности используются для точного преобразования широкополосных сигналов в цифровую форму [1, 2]. В таких УВХ буферный повторитель предназначен для передачи расширенного импульса напряжения значительной длительности с накопительного конденсатора на АЦП. При полосе пропускания УВХ несколько гигагерц емкость накопительного конденсатора весьма мала ( $\sim 100\text{--}200$  фФ), поэтому даже малый входной ток выходного повторителя напряжения  $I_g$  может исказить результаты измерений. Кроме того, высокая воспроизводимость и стабильность коэффициента передачи повторителя гарантируются только слабой его зависимостью от технологического разброса параметров элементов.

В настоящей работе анализируются свойства прецизионного повторителя напряжения, удовлетворяющего сформулированным требованиям.

Простейший истоковый повторитель (см. рис.1,а) содержит два идентичных нормально открытых транзистора  $G_1$  и  $G_2$  с пороговым напряжением  $V_t < 0$  и имеет коэффициент передачи

$$K = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 + 2/K_0}, \quad (1)$$

где  $K_0 = \partial V_{ds} / \partial V_{gs} \big|_{dI_d=0} = g/G$  – собственный коэффициент усиления транзистора по напряжению;  $g = \partial I_d / \partial V_{gs}$  – крутизна;  $G = \partial I_d / \partial V_{ds}$  – выходная проводимость транзисторов;  $I_d$  – ток стока;  $V_{gs}, V_{ds}$  – напряжения затвор–исток, сток–исток. Коэффициент 2 обусловлен тем, что по переменному току выход повторителя шунтируют выходные проводимости обоих транзисторов.

Некоторое повышение коэффициента передачи достигается применением каскодной нагрузки (идентичные транзисторы  $G_2$  и  $G_3$ , рис.1,б). В этом случае шунтирующее действие выходной проводимости транзистора  $G_2$  практически нейтрализуется и коэффициент передачи составляет

$$K = \frac{1 + 2/K_0}{1 + 3/K_0 + 3/K_0^2} \xrightarrow{K_0 \gg 1} \frac{1}{1 + 1/K_0}. \quad (2)$$

Отметим, что применение каскодной нагрузки не снижает входного тока  $I_g$ .

Действие прецизионного истокового повторителя (рис.1,в) основано на том, что входное напряжение с близким к единице коэффициентом передается на сток входного транзистора, в результате чего напряжение сток–исток входного транзистора практически не изменяется при изменении входного напряжения.

Положим для простоты, что, как и в повторителях на рис.1,а,б, при  $V_{gs} = 0$  все транзисторы работают в пологой области ВАХ. Из условий  $I_1 = I_4$ ,  $I_2 = I_3$  и  $I_1 + I_5 = I_2$  (см. рис.1,в) следует, что для этого должны быть выполнены равенства:

$$w_1 = w_4, w_2 = w_3, w_1 + w_5 = w_2, \quad (3)$$

где  $w_i$  – ширина канала  $i$ -го транзистора. При этом ширина диода  $D_5$  (транзистора в диодном включении) выбирается равной ширине транзистора  $G_5$ . При  $w_5 = \delta w_1$  получаем:

$$g_4 = g_1; g_5 = \delta g_1; g_2 = g_3 = (1 + \delta)g_1, \quad (4a)$$

$$G_4 = G_1; G_5 = \delta G_1; G_2 = G_3 = (1 + \delta)G_1. \quad (4б)$$

Работа в пологой области ВАХ транзисторов  $G_{2-5}$  обеспечивается достаточной величиной питающих напряжений, а транзистора  $G_1$  – условием  $V_{ds} > V_{gs} - V_t = V_{dsS}$ . Откуда при  $V_{gs} = 0$  и с учетом того, что  $V_{ds1} = V_{D_5} - V_{gs4}$ , получаем:

$$V_{D_5} > V_{dgS}, \quad (5)$$

где  $V_{D_5}$  – напряжение на диоде  $D_5$ ;  $V_{dgS}$  – напряжение сток–затвор транзистора, соответствующее насыщению тока (границе крутой и пологой областей ВАХ) при  $V_{gs} = 0$ . Практически  $V_{D_5} \approx 0,9$  В,  $V_{dgS} \approx -V_t$  и условие (5) выполнено при  $V_t > -0,8$  В.

Коэффициент передачи прецизионного повторителя на рис.1,б и напряжение сток–затвор входного транзистора  $G_1$  могут быть найдены из уравнений (4а), (4б), уравнений для переменных составляющих токов:

$$\dot{I}_i = g_i \dot{V}_{gsi} + G_i \dot{V}_{dsi} = g_i (\dot{V}_{gsi} + \dot{V}_{dsi} / K_0)$$

и уравнений Кирхгофа для переменных составляющих напряжений  $\dot{V}_{gsi}, \dot{V}_{dsi}$ :

$$\dot{V}_{gs1} + V_{out} = V_{in}; \dot{V}_{gs2} + \dot{V}_{ds3} = 0; \dot{V}_{gs4} = -\dot{V}_{ds1}; \dot{V}_{ds3} = V_{out} - \dot{V}_{ds2},$$

$$\dot{V}_{ds4} + \dot{V}_{ds1} + V_{out} = 0; \dot{V}_{ds5} + V_{out} = 0; \dot{V}_{dg1} = \dot{V}_{ds1} - V_{in} + V_{out}.$$

Исключая все переменные, кроме  $V_{in}$  и  $V_{out}$ , имеем:

$$K = \frac{1}{1 + [\delta + (2 + 3\delta)/K_0] / (1 + K_0)}. \quad (6a)$$

При  $\delta \ll 1$  и  $K_0 \gg 2$

$$K \approx \frac{1}{1 + \delta / K_0 + 2 / K_0^2}, \quad (6б)$$

$$\dot{V}_{dg1} = \frac{-V_{in}}{K_0} \cdot \frac{1 + (1 - 1/K_0)(\delta + 2/K_0)}{1 + 2/K_0}. \quad (7a)$$

При  $K_0 \gg 2$

$$\dot{V}_{dg1} \approx -V_{in} (1 + \delta) / K_0. \quad (7б)$$



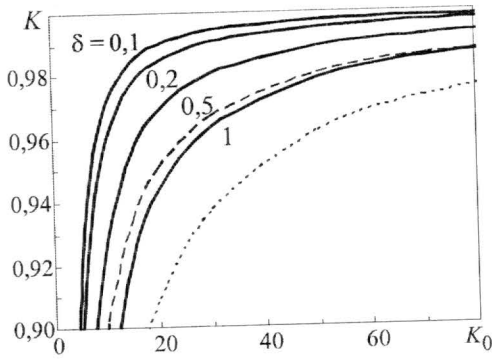


Рис.2. Зависимость коэффициента передачи истокового повторителя от собственного коэффициента усиления транзисторов: ..... обычный повторитель; ----- с каскодной нагрузкой; ———— прецизионный параметр ( $\delta = w_s/w_1$ )

При  $\delta \leq 0,2$  (рис.2) прецизионный повторитель имеет значительно лучший коэффициент передачи, чем его прототипы (см. рис.1,а,б). При типичном значении  $K_0 = 25$  и  $\delta = 0,2$  коэффициент передачи отличается от 1 менее чем на 1%, что гарантирует его высокую воспроизводимость и стабильность. Для повторителя с каскодной нагрузкой этот показатель составляет 4%, а для обычного повторителя – 7,5%.

В работе [3] показано, что в полевых транзисторах на основе GaAs обратный ток закрытого барьерного контакта затвор–сток (ток  $I_g$  на рис.1) обусловлен туннельной эмиссией электронов в краевой области затвора и имеет близкую к экспоненциальной ВАХ вида

$$I_g = I_{g0} (e^{V_{dg}/V_0} - 1). \quad (8)$$

По данным [3], напряжение активации туннельного тока  $V_0$  составляет  $\sim 0,7$  В. Таким образом, ток  $I_g$  резко возрастает с ростом напряжения сток–затвор  $V_{dg}$ .

В повторителях, показанных на рис.1,а,б, входной ток соответствует напряжению

$$V_{dg1} = V_{dd} - V_{in}. \quad (9)$$

Минимальная величина напряжения  $V_{dd}$  должна быть достаточна для работы транзистора  $G_1$  в пологой области ВАХ и определяется условием

$$V_{dd} > V_{dgS} + V_{in\max}. \quad (10)$$

Полагая  $-\Delta V_{in} \leq V_{in} \leq \Delta V_{in}$ , из (8) – (10) получаем:

$$V_{dg1\min} = V_{dg0} - \Delta V_{in} > V_{dgS}, \quad (11a)$$

$$V_{dg1\max} = V_{dg0} + \Delta V_{in}, \quad (11b)$$

$$I_{g\min} = I_{g0} [\exp(V_{dg1\min}/V_0) - 1], \quad (12a)$$

$$I_{g\min} = I_{g0} \{ \exp[(V_{dg1\min} + 2\Delta V_{in})/V_0] - 1 \}, \quad (12b)$$

где  $V_{dg0} = V_{dg1\min} + \Delta V_{in}$  – рабочее напряжение сток–затвор транзистора  $G_1$  (при  $V_{in} = 0$ );  $\Delta V_{in} > 0$  – амплитуда входного сигнала.

На рис.3 представлена вольт-амперная диаграмма транзистора  $G_1$ , на которой показаны выходная ВАХ  $I_d(V_{dg})|_{V_{gs}=0}$  (напряжение затвор–исток транзистора  $G_1$  составляет  $V_{gs1} = V_{in}(1 - K)$ , однако его отличие от нулевого значения мало и для наших целей несущественно) и ВАХ тока затвора  $I_g(V_{dg})$ . При ее построении использованы эксперимен-

тальные данные для ПТШ с  $\delta$ -легированным каналом [4] (ширина канала  $w = 50$  мкм, пороговое напряжение  $V_t = -0,6$  В, параметры ВАХ тока  $I_g$ :  $I_{g0} \approx 1$  нА,  $V_0 = 0,72$  В, коэффициент усиления напряжения  $K_0 \approx 25$ ). Значение  $V_{dg1min}$  принято равным 0,9 В. В соответствии с соотношениями (11а), (11б), (12а), (12б) при амплитуде входного сигнала  $\Delta V_{in} = 1$  В входной ток  $I_g$  изменяется от  $I_{gmin} \approx 2,5$  нА до  $I_{gmax} \approx 55$  нА. При большом выходном импедансе источника сигнала значительная величина тока  $I_g$  может исказить результаты измерения входного сигнала, а большой диапазон его изменения – приводить к нелинейности передаточной характеристики повторителя.

В прецизионном повторителе (см. рис.1,б) изменение напряжения  $V_{dg1}$  под действием входного сигнала нейтрализуется передачей выходного напряжения на сток транзистора  $G_1$  по цепи  $D5-G5-G4$ . При этом с учетом (7б)

$$V_{dg1} = V_{dg0} + \dot{V}_{dg1} = V_{dg0} - V_{in}(1 + \delta)/K_0,$$

$$V_{dg1min} = V_{dg0} - \Delta V_{in}(1 + \delta)/K_0,$$

$$V_{dg1max} = V_{dg0} + \Delta V_{in}(1 + \delta)/K_0.$$

При  $\delta \leq 0,2$  зона сигнала на диаграмме, показанной на рис.3, сокращается более чем в 20 раз. Максимальная величина входного тока согласно (8) составляет

$$I_{gmax} = I_{g0} \left[ \exp \frac{V_{dg1min} + 2\Delta V_{in}(1 + \delta)/K_0}{V_0} - 1 \right].$$

Значение входного тока не превышает 3 нА, т.е. уменьшается более чем в 18 раз и очень слабо зависит от амплитуды входного сигнала (при  $\Delta V_{in} = 1$  В  $I_{gmax}/I_{gmin} < 1,2$ ).

Если пороговое напряжение транзисторов  $V_t < -0,7$  В, одного диода  $D_5$  может оказаться недостаточно для работы транзистора  $G_1$  в пологой области ВАХ. Некоторое повышение напряжения  $V_{dg1}$  может быть достигнуто повышением напряжения  $V_{dg0} = V_{D5} - V_{gs4}$  за счет уменьшения ширины диода  $D_5$  (увеличение  $V_{D5}$ ) и ширины канала  $w_4$  транзистора  $G_4$  (снижение  $V_{gs4}$ ). Нарушение равенства  $w_1 = w_4$  в (3) несколько корректирует формулу (6а), однако это слабо сказывается на конечных результатах.

На рис.4,а,б представлены зависимости дифференциальных коэффициентов передачи  $K$  рассмотренных истоковых повторителей на арсенидгаллиевых ПТШ и входного тока  $I_g$  от входного напряжения  $V_{in}$ , полученные компьютерным моделированием в про-

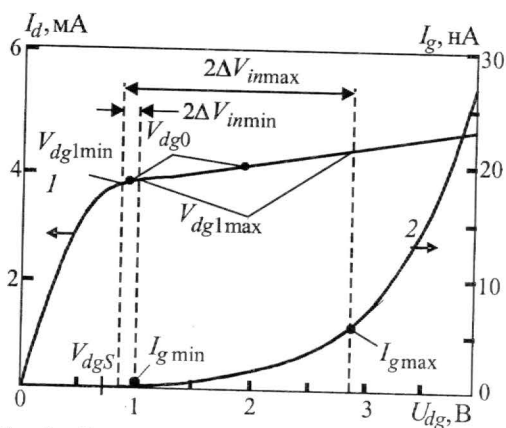


Рис.3. Вольт-амперная диаграмма арсенидгаллиевого ПТШ  $G_1$  ( $V_t = -0,6$  В,  $w = 50$  мкм): 1 – выходная ВАХ при  $V_{gs} = 0$ ; 2 – ВАХ обратного тока затвор-сток.  $V_{dg0}$  – рабочая точка ( $V_{in} = 0$ );  $2\Delta V_{in}$  – зоны сигнала при  $\Delta V_{in} = 1$  В: слева – для повторителей на рис.1,а,б; справа – для прецизионного повторителя (см. рис.1,в)

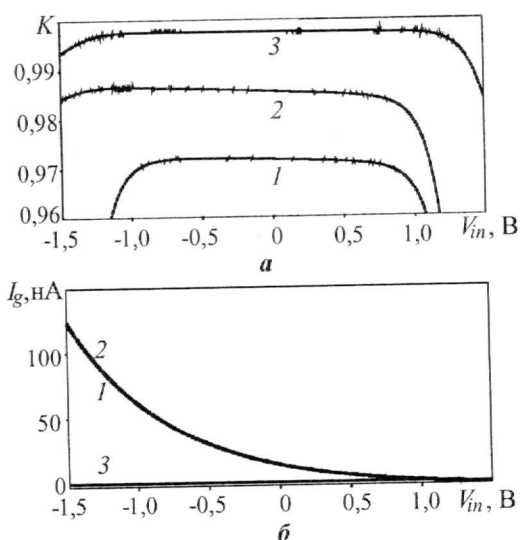


Рис.4. Зависимости дифференциальных коэффициентов передачи истоковых повторителей на арсенидгаллиевых ПТШ (а) и входного тока (б) от входного напряжения  $V_{in}$ : 1 – простейший ( $V_{dd} = +2$  В,  $V_{ss} = -2$  В); 2 – с каскодной нагрузкой ( $V_{dd} = +2$  В,  $V_{ss} = -4$  В); 3 – прецизионный ( $V_{dd} = +3,5$  В;  $V_{ss} = -4$  В;  $\delta = 0,1$ )

грамме PSpice A/D системы проектирования OrCAD 10.0 (модель четвертого уровня Паркера–Скеллерна [4]). Из рисунка видно, что прецизионный истоковый повторитель не только обеспечивает более высокий коэффициент передачи и радикальное снижение входного тока, но и значительно повышает линейность передаточной характеристики в широком диапазоне входных напряжений.

Результаты анализа показывают, что применение прецизионного истокового повторителя (см. рис.1, в) при  $\delta = w_5/w_1 = 0,1-0,2$  уменьшает отклонение коэффициента передачи от предельного значения  $K = 1$  в несколько раз. Кроме того, стабилизируется коэффициент передачи и повышается линейность передаточной характеристики, а также обеспечивается радикальное снижение входного тока и его слабая зависимость от амплитуды входного сигнала.

К недостаткам прецизионного повторителя следует отнести усложнение схемы, повышение питающего напряжения  $U_{dd}$  и некоторое увеличение потребляемого тока (в  $1 + \delta$  раз).

### Литература

1. Горбачевич А.А., Налбандов Б.Г., Старосельский В.И., Шмелев С.С. Арсенид-галлиевые интегральные микросхемы для систем телекоммуникаций, радиолокации и измерительной техники // Изв. вузов. Электроника. – 2005. – № 4–5. – С. 72–78.
2. Гуминов Н.В., Старосельский В.И., Шмелев С.С. Интегральные устройства выборки и хранения на основе полупроводниковых соединений  $A^{III}B^V$  // Нанотехнологии в электронике: Сб. науч. тр. / Под ред. А.А.Горбачевича. – М.: МИЭТ, 2007. – С. 138–148.
3. Бурзин С.Б., Старосельский В.И., Шмелев С.С. Исследование обратных ВАХ гетероструктурного полевого транзистора с затвором Шоттки в диодном включении // Микроэлектроника. – 2007. – Т. 36, № 4. – С. 243–254.
4. Parker A.E., Skellern D.J. A realistic large-signal MESFET model for SPICE // IEEE Trans. – 1997. – Vol. MTT-45. – P. 1563–1571.

Статья поступила 19 октября 2007 г.

**Гуминов Николай Владимирович** – ассистент кафедры интегральной микроэлектроники и микросистем МИЭТ. Область научных интересов: разработка арсенидгаллиевых ИС для систем обработки и передачи информации (устройства выборки-хранения аналоговой информации, усилители, компараторы, цифровые ИС), разработка гибридных СВЧ-модулей для сверхширокополосных систем связи.

**Старосельский Виктор Игоревич** (1938 – 2007) – доктор технических наук, профессор кафедры интегральной электроники и микросистем МИЭТ. Автор 180 научных трудов. Ученый в области сверхскоростных устройств обработки информации, моделирования полупроводниковых приборов. Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники.

# НАНОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 620.22-022.532:620.187.3

## Проблемы текстурированности в нанотехнологии. Контроль текстур

*С.К.Максимов*

Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)

*К.С.Максимов*

АНО «Аналитика и высокие технологии» (г. Москва)

Проанализированы сведения о текстурированности наноматериалов и отмечено, что текстуры возникают даже в тех случаях, когда видимые причины их возникновения отсутствуют. Указано, что проблема текстурированности особенно актуальна при медико-биологическом их применении. Отмечена связь текстурированности с формообразованием нанокристаллов и подчеркнуто, что влияние размерного фактора на морфологию нанокристаллов особенно велико для кристаллов с линейными размерами менее 10 нм. Предложено контролировать текстуры подобных кристаллов методом OTED, реализуемым в колонне электронного микроскопа.

К настоящему времени определился ряд проблем, связанных с производством наноматериалов, изучением их структуры и свойств, их применением, влиянием на экологию, рисками для здоровья и жизни. Существует множество технологий для получения сплошных, пористых, пленочных, порошковых материалов с наноразмерными кристаллами и одномерных проволок или нитей. Эти материалы имеют ряд областей применения, в частности, они востребованы в фармакологии как среды-катализаторы и в медицине, где используются в диагностике, терапии, хирургии [1, 2]. Фундаментальные свойства этих материалов зависят не только от их состава и структуры, но также от размеров формирующих их кристаллитов. Даже сама структура материалов может изменяться при изменении их размеров, что обусловило многообразие их свойств [2, 3]. Однако вопреки этому многообразию существует проблема, присущая как минимум многим из них: кристаллиты имеют преимущественные кристаллографические ориентировки (текстурированность).

Текстурированность объяснима для материалов, получаемых деформацией или осаждением на ориентирующие подложки [2], но она наблюдается также, если внешние причины ее генерации, на первый взгляд, отсутствуют: при кристаллизации из расплава [4], получении и спекании порошков [5], золь-гель процессе [6]. Преимущественные ориентации наблюдались у нанотрубок, сформированных на поверхностях нанокристаллов [7], у металлических наночастиц, выращенных в контакте с нанотрубками [8], у порошков [9].



В работе [10] проанализировано состояние проблемы текстурированности наноматериалов в мировой науке и практике с помощью справочной системы «Ingenta» за период, начиная с 1995 г. В огромном числе публикаций по нанотехнологиям, наноматериалам, нанокристаллам, наночастицам лишь в единичных упоминается текстурированность и только в нескольких статьях сделана попытка оценить развитие текстур и их роль. Например, в [11, 12] отмечалось влияние текстуры на катализ, причем изучались текстуры субстратов, а не самих катализаторов.

Ранее возникновение текстур связывалось с пластической деформацией, кристаллизацией или рекристаллизацией, влиянием ориентирующих подложек. Признавались и другие факторы, вызывающие их развитие, например направленность транспорта материалов к ростовой поверхности [13]. Эти факторы можно условно определить как технологические, они играют роль и при возникновении текстурированности наноматериалов, но текстурированность наноматериалов связана также с фундаментальной проблемой. Вклад поверхностной энергии в химпотенциал для кристаллических агрегатов быстро возрастает с уменьшением этих размеров. Для отдельных кристаллитов минимизация химпотенциала достигается при этом за счет огранки по плоскостям с минимальной поверхностной энергией [14]. Для агрегатов наноразмерных кристаллитов минимизация химпотенциала связана также с минимизацией энергии междокристаллитных контактов. Текстурированность – следствие неравновесности наноструктурирования [10].

Текстурированность, обусловленную минимизацией химпотенциала, можно определить как термодинамическую. Из общих соображений она должна быть теснейшим образом связана с морфологическими формами отдельных кристаллитов. Однако даже проблема равновесных форм нанокристаллов не может считаться исчерпанной: в [14] она решалась посредством сопоставления энергетики только двух плоскостей  $\{001\}$  и  $\{111\}$ . Утверждалось, что переход от октаэдрической огранки, присущей «макноразмерным» кристаллам, к кубической, требуемой их наноразмерностью, происходит через развитие усеченных (truncated) форм, в которых вершины октаэдра «срезаны» гранями  $\{001\}$ . С уменьшением размера кристалла площади «срезок» увеличиваются, пока огранка по плоскостям  $\{001\}$  не станет преобладающей. Минимизация энергии сопряжения, по-видимому, требует, чтобы оно осуществлялось по одноименным плоскостям. Для упругих анизотропных кристаллов с идентичными постоянными решетки энергия когерентного сопряжения по плоскостям  $\{001\}$ ,  $\{011\}$  и  $\{111\}$  одинакова [15]. Поэтому можно предположить, что характер термодинамической текстурированности определяется доминирующим типом граней, т.е. с уменьшением размеров кристаллитов текстуры с осями  $\langle 111 \rangle$  должны сменяться текстурами с осями  $\langle 001 \rangle$ .

Однако термодинамика вряд ли определяет закономерности текстурированности для всех случаев. Морфология кристаллов может зависеть также от кинетики [3, 14]. Возникновение текстур и их характеристики (тип, ось, дисперсия, доля ориентированных кристаллов) зависят от параметров технологического процесса [16]. В свою очередь, свойства наноматериалов зависят от наличия или отсутствия текстуры и ее параметров [13]. Морфология особенно чувствительна к размерам кристаллитов  $< 10$  нм, например для TiN уменьшение этих размеров до  $< 10$  нм приводит к изменению преимущественной огранки по плоскостям  $\{111\}$  на огранку по плоскостям  $\{001\}$ . Поэтому особое значение приобретают методы контроля текстур кристаллов с размерами меньше 10 нм.

Контроль текстурированности особенно важен для материалов, используемых в медицине или фармакологии [1]. Наноматериалы обладают повышенной каталитиче-

ской активностью [17], что связано с угрозами для окружающей среды и даже для здоровья человечества в целом [18, 19]. Текстурированность изменяет каталитическую активность материала [17], что должно или увеличивать, или уменьшать эти риски. Риски связаны, в первую очередь, с порошковыми материалами, но это не исключает проблемы текстурированности, поскольку ее проявления отмечались также для порошков [9]. Последствия текстурированности при массовом производстве наноматериалов связаны также с тем, что текстуры влияют на межкристаллитные связи [13]. Это определяет долю наночастиц, загрязняющих атмосферу. Причем в большинстве технологий возникают также фракции кристаллитов с размерами меньше 10 нм.

Контакты с биоматерией могут приводить к упорядочению наночастиц, что реализуется через упорядочение их ориентаций [20]. Для изучения механизма взаимодействия наноматериала и живой материи необходимо иметь информацию о процессах в обеих контактирующих средах [21]. Конечно, возникновение преимущественных ориентаций кристаллитов только внешнее проявление этих взаимодействий, но без изучения ориентаций невозможно промоделировать и понять процесс взаимодействия в целом.

Основными методами изучения и контроля текстур являются рентгеноструктурный анализ (XRD) и растровая электронная микроскопия. Хотя XRD позволяет выявлять текстуры с размерами кристаллитов, превышающими 2–3 нм, оптимальная область его применения это текстуры кристаллитов  $\gg 10$  нм [22]. Метод растровой электронной микроскопии основан на дифракции обратно рассеянных электронов, реализуется в растровых микроскопах и известен как EBSD. Он позволяет интегрально исследовать не только текстурированность, но также распределение фаз, характер межкристаллитных границ, интегральную плотность дефектов. Хотя для этого метода достигнуто разрешение (минимальный размер кристаллов, выявляемого EBSD) в 6–9 нм [23], большинство авторов считает, что надежные результаты достигаются для кристаллов  $> 10$  нм и даже приближающихся к 100 нм [24]. Поэтому для текстур кристаллитов  $< 10$  нм применение и XRD и EBSD проблематично. Однако главный недостаток этих методов связан с другой проблемой. Текстура – одна из характеристик общей структуры материала и при выяснении механизмов наноструктурирования она должна сопоставляться с другими элементами структуры, выявляемыми только в просвечивающей электронной микроскопии (TEM) и высокоразрешающей TEM (HRTEM). Результаты XRD и EBSD могут сопоставляться с результатами TEM и HRTEM лишь на основе статистической обработки, что недостаточно для решения многих проблем [2]. Поэтому сделаны попытки осуществлять контроль текстурированности в TEM и HRTEM, но даже их авторы признали ограниченность своих попыток [25, 26]. Не видно путей использования XRD, EBSD, TEM и HRTEM для композиций: нанокристаллы на органическом субстрате.

Текстуры кристаллитов с размерами  $< 10$  нм могут контролироваться посредством метода [27], реализуемого в колонне электронного микроскопа и основанного на результатах работ З.Г.Пинскера и Б.К.Вайнштейна по закономерностям электронограмм текстур [28]. Обратная решетка текстуры может быть получена, если вращать обратную решетку монокристалла вокруг оси, совпадающей с осью текстуры, поэтому рефлексy приобретают кольцеобразную форму (рис.1,а). Дисперсия преобразует кольца в сферические пояса (рис.1,б). В результате поворотов направления образуют поверхности вращения (рис.2). Для контроля текстур перспективны сечения обратной решетки, наклоненные относительно оси текстуры. Этот метод именуется «методом косых текстур» или OTED [29].

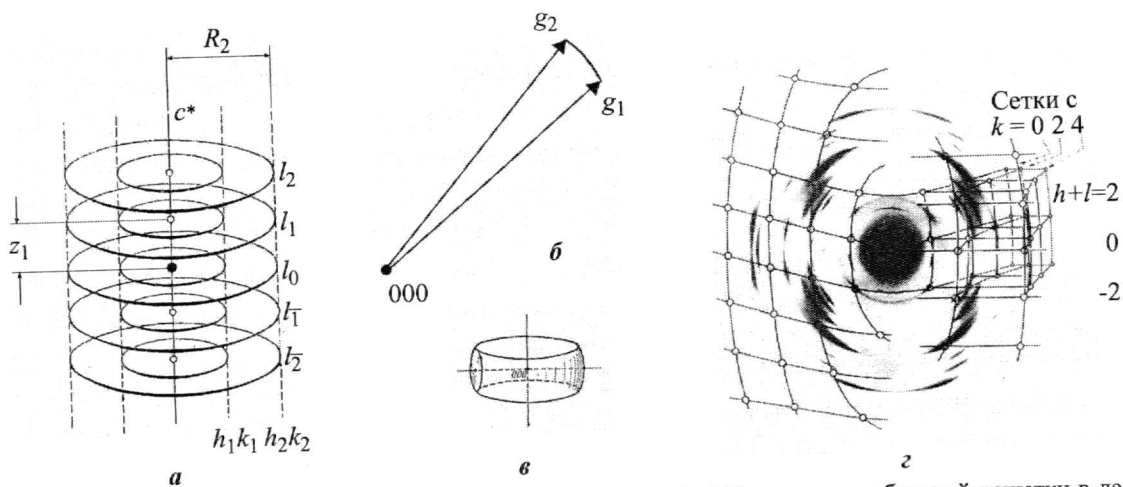


Рис. 1. Обратная решетка текстуры (трехмерное изображение):  $hkl$  – индексы обратной решетки в декартовых координатах,  $z$ ,  $R$  – индексы в цилиндрических координатах (а); форма узла обратной решетки в сечении, проходящем через ось текстуры (б); узел обратной решетки как шаровой пояс (в); формирование электронограммы в результате вращения решетки монокристалла, изображенной справа; узлы решетки монокристалла изображены слева; рефлексы имеют дугообразную форму (г)

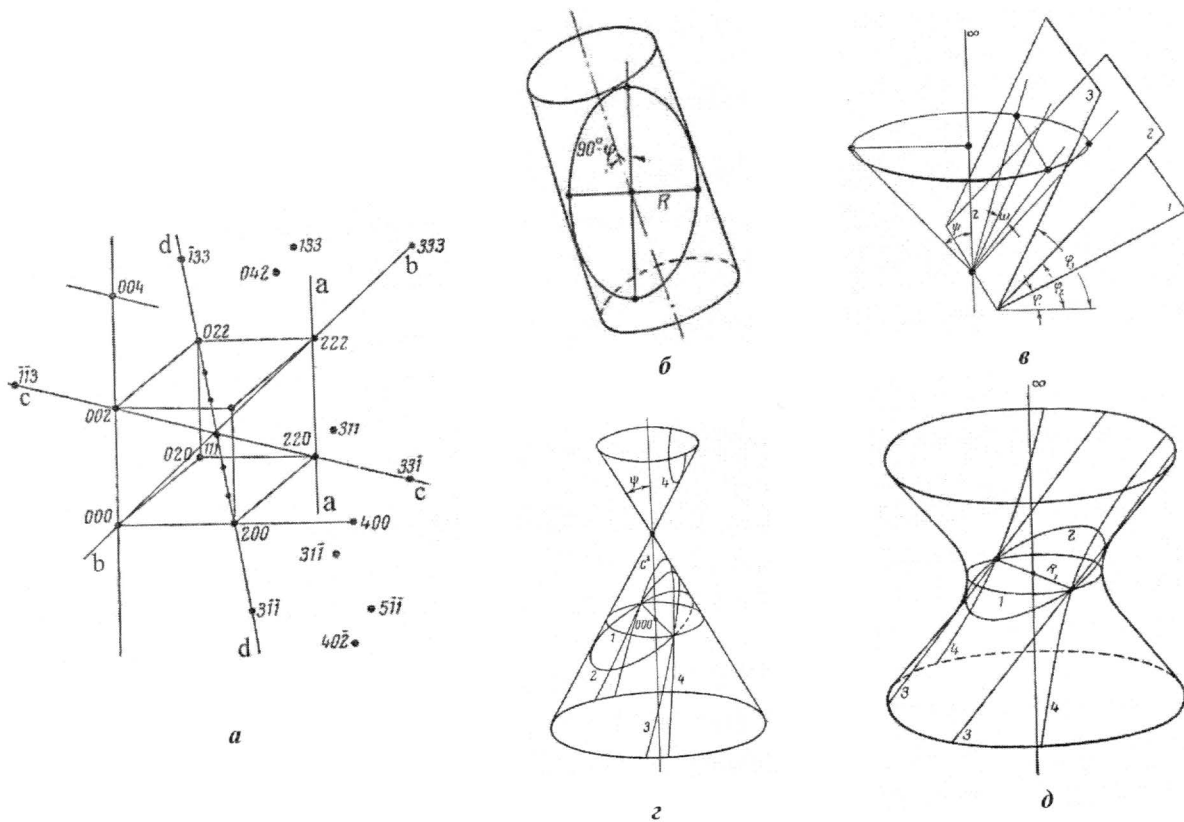


Рис. 2. Ориентация направлений относительно оси текстуры: а-а – параллельные оси; б-б – пересекающие ось в узле 000; с-с – пересекающие ось в произвольной точке; d-d – не пересекающие оси (а); вращение направлений а-а дает цилиндрическую поверхность, сечение которой наклонной плоскостью приводит к эллипсу, на котором лежат рефлексы, локализованные на направлении а-а (б); вращение направления б-б дает конус с вершиной в узле 000; плоскость 1 не касается конуса, и рефлексы, лежащие на его поверхности, отсутствуют; плоскость 2 касается поверхности конуса, и на электронограмме появляются рефлексы последовательности  $hkl$ ; при дальнейшем наклоне сечение пересекает каждый рефлекс в двух точках, и появляются пары рефлексов ( $111$ ,  $222$  и пр.) (в); вращение направления с-с дает конус с вершиной на оси текстуры (г); вращение направления d-d дает гиперboloид вращения (д). Сечения конуса и гиперboloида дают окружности, эллипсы, параболы, гиперболы и пары прямых

На наклонных проекциях кристаллографические направления трансформируются в кривые 2-го порядка, на которых лежат рефлексы. Каждое направление искривляется по своему закону в зависимости от ориентации относительно оси текстуры, пересечения или непересечения с этой осью, наклона сечения, расходимости освещающего пучка (см. рис.2). Благодаря разному характеру искривлений сечения суть перспективные изображения обратной решетки кристалла. Они содержат информацию, необходимую для исчерпывающего исследования текстур. Вид экспериментальных электронограмм представлен на рис.3. Угол  $\omega$ , измеряемый по электронограмме, позволяет контролировать наклон сечения  $\varphi$  относительно оси текстуры  $\cos\psi = \cos\omega \cdot \sin\varphi$  (углы  $\psi$ ,  $\varphi$  и  $\omega$  указаны на рис.2,д). Координаты в обратном пространстве связаны уравнениями:  $\eta = z/\sin\varphi$ ,  $\xi^2 = R^2 - (z \cdot \text{ctg}\varphi)^2$  [28]. Уже возникновение OTED доказывает существование текстуры. Ось текстуры легко найти как перпендикуляр к малым осям двух эллипсов. Тип текстуры определяется по наличию или отсутствию отражений с определенными  $hkl$  на линиях, проходящих через 000, а также на проекциях, перпендикулярных или параллельных оси текстуры, дисперсия находится по форме отражений, долю кристаллитов, не участвующих в текстурировании, можно найти по относительным интенсивностям отражений, запрещенных для конкретной текстуры [27].

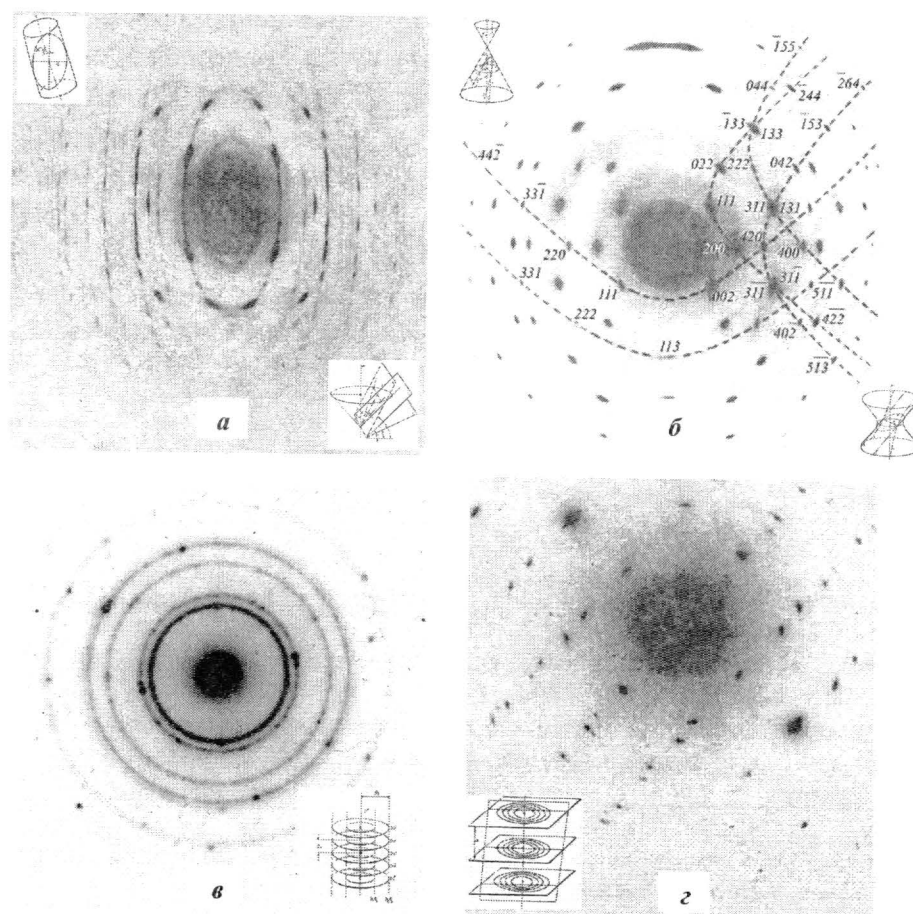


Рис.3. Типичные электронограммы текстур. На врезках указаны ситуации, которым они отвечают: а – электронограмма с расположением рефлексов на эллиптических кривых и расщеплением отражений, локализованных на направлениях, проходящих через узел 000; б – электронограмма с расположением рефлексов на параболах и гиперболах; в – кольцевая электронограмма, отвечающая проекции вдоль направления оси текстуры; г – электронограмма с расположением рефлексов на слоевых линиях, отвечающая проекции, нормальной оси текстуры



Современные ТЕМ имеют набор режимов, обеспечивающих реализацию OTED и контроль текстур. Освещающий пучок может быть параллельным в основном режиме или коническим в режиме сходящегося пучка (CBED). Форма пучка в CBED соответствует требованиям OTED; а его диаметр может быть доведен до  $\approx 1$  нм, что позволяет изучать ориентации отдельных кристаллов. В основном режиме локальность обеспечивается селективной диафрагмой и не зависит от размеров освещенной области. Поэтому электронограммы могут формироваться при минимальной расходимости пучка, т.е. при высоком угловом разрешении. При этом брэгговские условия для кристаллов с разными ориентациями обеспечиваются в режиме качающегося пучка, а также комбинарованными режимами, предусматривающими наклоны образцов и пучков. Реализация основного режима в сочетании с режимом сканирования (STEM) позволяет изучать распределения конкретно ориентированных кристаллов по объему (в том числе в зависимости от вариаций структуры самого материала или субстрата). Наклоны освещающего пучка обеспечивают идентичные условия для получения разных рефлексов и их сопоставления, что принципиально при изучении дисперсии, и т.д.

Регистрация электронограмм посредством CCD камер делает возможным компьютеризировать весь процесс исследования текстуры, включая не только обработку полученных электронограмм, но также определение пути дальнейших исследований и даже управление работой прибора для реализации этого пути. Это позволит сократить время, требуемое для полного исследования текстуры, до  $\approx 10$  мин. Шереровское размытие рефлексов на электронограммах в 20–50 раз меньше, чем в XRD, поэтому OTED применим даже для кристаллов в 1 нм. Реализация OTED в электронном микроскопе создает условия для всеобъемлющих структурных исследований, в которых он может сочетаться со всем спектром ТЕМ и HRTEM методик, причем в одном эксперименте и для одного и того же объема. Он может также сочетаться с исследованиями в режиме малых доз, что позволит изучать композиции нанокристаллы/биологический субстрат.

### Литература

1. *Lanone S., Boczkowski J.* Biomedical applications and potential health risks of nanomaterials: molecular mechanisms // *Molecular Medicine*. – 2006. – Vol. 6, N 6. – P. 651–663.
2. *Springer Handbook of Nanotechnology*. 2<sup>nd</sup> ed. Bhusan. Bharat (Ed.). – 2007 // Springer. Berlin. Heidelberg. – P. 1916.
3. *Barnard, Amanda S.A.* Special issue on theory and simulation of nanomorphology // *J. of Computational and Theoretical Nanoscience*. – 2007. – Vol. 4, N 2. – P. i-ii.
4. *Shen T., Zhang X., Han K., et al.* Structure and properties of bulk nanostructured alloys synthesized by flux-melting // *J. of Materials Science*. – 2007. – Vol. 42, N 5. – P. 1638–1648.
5. Synthesis and consolidation of iron nanopowders nanostructured materials / *R.Kalyanaraman, S.Yoo, M.S.Krupashankara et al.* // *Nanostructured Materials*. – 1998. – Vol. 10, N 8. – P. 1379–1392.
6. *Ana C.M., Himanshu J., Rui M.A.* Sol-gel derived nano/macroporous scaffolds // *Physics and Chemistry of Glasses*. – 2007. – Vol. 48, N 2. – P. 65–68.
7. A possible route to large-scale production of SWNTs through a combination of the substrate and floating catalyst methods / *M.Endo, T.Hayashi, Y.A.Kim et al.* // *J. of Nanoscience and Nanotechnology*. – 2004. – Vol. 4, N 1–2. – P. 132–135.
8. Carbon nanotube arrays for photovoltaic applications / *Camacho R., Morgan A., Flores M. et al.* // *JOM*. – 2007. – Vol. 59, N 3. – P. 39–42.
9. The mechanisms of particle formation in Y-doped  $ZrO_2$  / *T.E.Konstantinova, A.V.Ragulya, A.S.Doroshkevich et al.* // *Intern. J. of Nanotechnology*. – 2006. – Vol. 3, N 1. – P. 29–38.

10. **Максимов К.С., Максимов С.К.** Проблема контроля текстур в нанотехнологиях. Обзор // Тез. докл. конф. «Нанотехнологии – производству» (Фрязино, ИПЭ, 2007) . – 2007. – С. 62.
11. Supported chromia catalysts for oxidation of organic compounds – The state of chromia phase and catalytic performance / **C.M.Pradier, F.Rodrigues, P.Marcus et al.** // Applied Catalysis B: Environmental. – 2000. – Vol. 27, N 2. – P. 73–85.
12. **Kaneko E.Y., Pulcinelli S.H., Teixeira da Silva V., Santilli C.V.** Sol-gel synthesis of titania-alumina catalyst supports // Applied Catalysis A: General. – 2002. – Vol. 235, N 1. – P. 71–78.
13. Textures in Materials Research / **Ed. R.K.Ray, A.K.Singh** // Science Publishers. – 1999. – P. 489.
14. **Barnard A.S.** Shape and energetics of TiN nanoparticles // J. of Computational and Theoretical Nanoscience. – 2004. – Vol. 1, N 3, P. 334–339.
15. **Максимов С.К., Максимов К.С.** Механизм наноструктурирования  $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$  со структурой на основе  $\text{CaF}_2$  // Неорганические материалы. – 2007. – Т. 43, № 5. – С. 626–631.
16. Deposition of nanosized particles in cylindrical tubes under laminar and turbulent flow conditions / **J.Malet, L.Alloul, N.Michielsen et al** // J. of Aerosol Science. – 2000. – Vol. 31, N 3. – P. 335–348.
17. Nanotechnology in Catalysis. Vol. 1. / **Ed. Lockwood D.J., Hermans S.** – Kluwer Academic Publishers, 2004. – P. 555.
18. **Rhodes C.J.** Reactive radicals on reactive surfaces: heterogeneous processes in catalysis and environmental pollution control // Progress in Reaction Kinetics and Mechanism. – 2005. – Vol. 30, N 3. – P. 145–213.
19. **Singh S., Nalwa Y.S.** Nanotechnology and health safety – toxicity and risk assessments of nanostructured materials on human health // J. of Nanoscience and Nanotechnology. – 2007. – Vol. 7, N 9. – P. 3048–3070.
20. Assembly of nanomaterials through highly ordered self-assembled monolayers and peptide-organic hybrid conjugates as templates / **H.Ma, M.T.Zin, M.H.Zareie et al.** // J. of Nanoscience and Nanotechnology. – 2007. – Vol. 7, N 8. – P. 2549–2566.
21. **Zapol P., Curtiss L.A.** Organic molecule adsorption on  $\text{TiO}_2$  nanoparticles: A review of computational studies of surface interactions // J. of Computational and Theoretical Nanoscience. – 2007. – Vol. 4, N 2. – P. 222–230.
22. **Leoni M., Di Maggio R., Polizzi S., Scardi P.** X-ray diffraction methodology for the microstructural analysis of nanocrystalline powders: application to cerium oxide // J. of the American Ceramic Society. – 2004. – Vol. 87, N 6. – P. 1133–1140.
23. **Dingley D.** Progressive steps in the development of electron backscatter diffraction and orientation imaging microscopy // J. of Microscopy. – 2004. – Vol. 213. – P. 214–224.
24. **Zaefferer S.** The electron backscatter diffraction technique – a powerful tool to study microstructures by SEM // JEOL News. – 2004. – Vol. 39, N 10. – P. 10–15.
25. **Dingley D.J.** Orientation imaging microscopy for the transition electron microscopy // Microchimica Acta. – 2006. – Vol. 155, N 1–2. – P. 19–29.
26. **Flores A.B., Robles L.A., Arias M.O., Ascencio J.A.** Small metal nanoparticle recognition using digital image analysis and high resolution electron microscopy // Micron. – 2003. – Vol. 34, N 2. – P. 109–118.
27. **Максимов С.К.** Интегральный метод исследования текстур в колонне электронного микроскопа. Его особенности и преимущества // Заводская лаборатория. – 2008. – Т. 74. – № 1.
28. **Вайнштейн Б.К.** Структурная электронография. – М.: Изд-во АН СССР, 1956. – С. 314.
29. **Vainshtein B.K., Zvyagin B.B., Aivilov A.S.** Electron diffraction structure analysis in electron diffraction techniques / Ed. Cowley M.J. – Oxford University Press, 1992. – P. 216–312.

Статья поступила

25 декабря 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 и твердотельных приборов, фазовые превращения, дефекты кристаллической структуры.

**Максимов Кирилл Сергеевич** – кандидат физико-математических наук, эксперт АНО «Аналитика и высокие технологии». *Область научных интересов:* кристаллофизика.

# СХЕМОТЕХНИКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ

УДК 621.3.049.779

## Построение цифровых схем на основе элементов конденсаторно-транзисторного типа

*В.Я.Кремлев, Т.Ю.Крупкина, А.В.Николаев*

Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)

Рассмотрены принципы организации, преимущества и недостатки логических схем, определяемых как конденсаторно-транзисторная логика (КТЛ). Рассчитаны временные диаграммы КТЛ-элементов, проведено моделирование D- и RS-триггеров, построенных на элементах КТЛ-типа. Выполнен сравнительный анализ характеристик устройств на КТЛ-элементах с КМОП-аналогами. Предложены методы улучшения параметров логических схем, построенных в КТЛ-базисе.

Развитие ряда схемотехнических решений в МДП-интегральной схемотехнике базируется на использовании МДП-транзисторов в сочетании с интегральными конденсаторами. Широко известен класс динамических МДП-схем, систематизированный и описанный в [1]. В качестве основного принципа и общей характерной черты динамических МДП-элементов отмечается функция хранения информации конденсатором, включенным между затвором МДП-транзистора и общей точкой. Как наиболее компактного из рассмотренных элементов выделяется одностранзисторный динамический элемент, выполняющий функции запоминания, сдвига во времени и инверсии цифровой информации.

Миниатюризация интегральных элементов и переход к низковольтным источникам питания привели к развитию схем «накачки заряда», позволяющих поднять напряжение в схеме выше уровня питания и удачно реализуемых в конденсаторно-транзисторном МДП-базисе [2, 3]. Поиск новых направлений развития динамических МДП-схем продолжается. В настоящей работе рассмотрены принципы организации, преимущества и недостатки логических схем, определяемых как конденсаторно-транзисторная логика.

Конденсаторно-транзисторную логику (КТЛ) можно описать как логику с «отношением емкостей». Обобщенная структурная схема базового элемента КТЛ приведена на рис.1,а. Отличительной особенностью логики с «отношением емкостей» является использование изменяющегося во времени источника питания с напряжением и конденсатора в качестве нагрузочного элемента. Нагрузочный конденсатор  $C_0$  образует с паразитной нагрузочной емкостью  $C_n$  емкостной делитель напряжения, со средней точки которого снимается выходной сигнал. Логический элемент работает следующим образом. Для того чтобы напряжение логической «1» сделать максимально близким к максимальному значению переменного напряжения питания,  $C_0$  выбирается из условия  $C_0 \gg C_n$ . При этом

$$U_{«1»} = U_{\text{вых}}^{\text{max}} = E_{\text{п}}(C_0 / (C_0 + C_n)) \approx E_{\text{п}}^{\text{max}},$$

где  $E_{\text{п}}^{\text{max}}$  — максимальное значение переменного напряжения питания. В КТЛ-схемах напряжение питания может быть синусоидальным или импульсным.

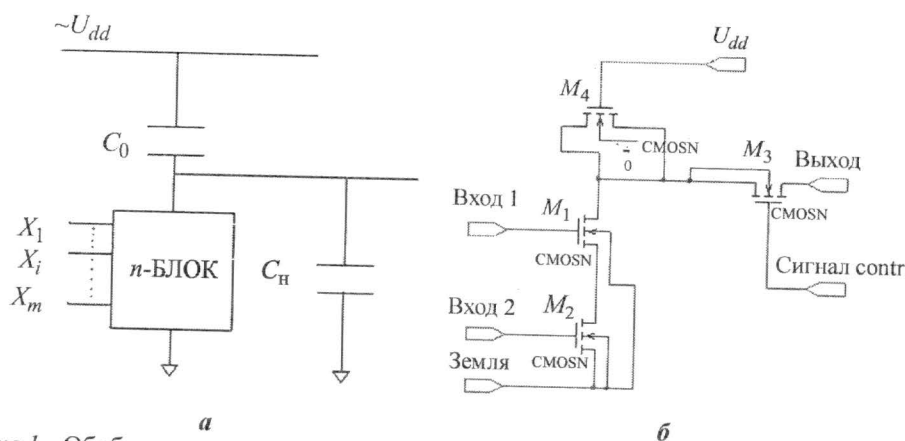


Рис.1. Обобщенная схема конденсаторно-транзисторной логики (а) и элемент 2И-НЕ (основа RS- и D-триггеров) (б)

Принцип действия КТЛ рассмотрим на примере последовательной цепочки простейших логических элементов – инверторов (рис.2,а), подключенной к источнику переменного напряжения  $\sim U_{dd}$ , временная диаграмма которого приведена на рис.2,б. Допустим, что вход первого инвертора ( $T_1, C_{01}$ ) подключен к общей шине, т.е. на входе будет логический «0» ( $U_{«0»} = 0$ ). Тогда транзистор  $T_1$  закрыт и при выполнении условия

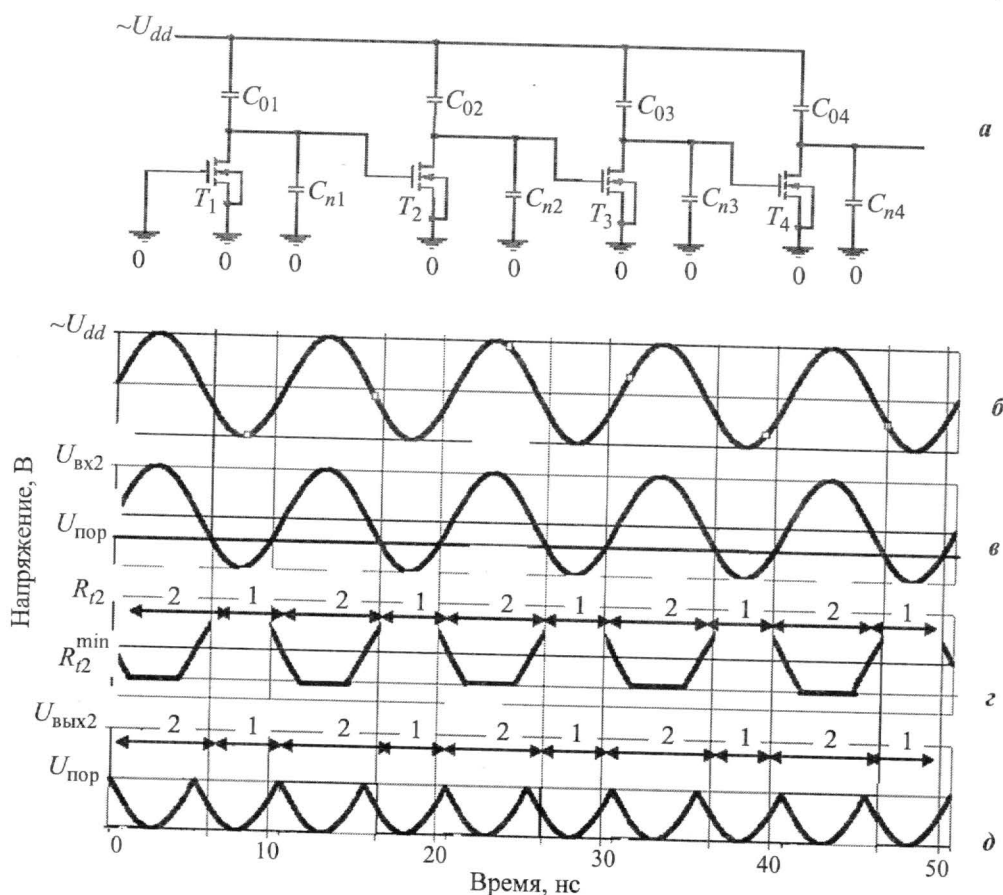


Рис.2. Последовательная цепь инверторов КТЛ-типа (а) и временные диаграммы работы инверторов: эпюра напряжения питания (б); эпюра напряжения на выходе первого инвертора (в); качественная зависимость сопротивления сток-исток транзистора  $T_2$  (г); эпюра напряжения на выходе второго инвертора (д)



$C_{01} \gg C_{n1}$  на выходе первого инвертора будет напряжение логической «1», определяемое выражением  $U_{\text{вых1}} = U_{\langle 1 \rangle} \approx U_{dd}(t)$ . Это переменное напряжение (рис.2,б) подается на вход второго инвертора (на затвор  $T_2$ ). При воздействии на затвор  $n$ -МОП-транзистора  $T_2$  переменного напряжения часть периода времени изменения напряжения транзистор будет находиться в закрытом состоянии (временные интервалы 1 на рис.2,з.), а оставшуюся часть периода – в открытом состоянии (временные интервалы 2 на рис.2,з.). В пределах временных интервалов 1 напряжение  $U_{\text{вх2}} = U_{\text{вых1}} \approx U_{dd}$  остается ниже порогового напряжения  $U_{\text{пор}}^n$  транзистора и его сопротивление между стоком и истоком велико и определяется только паразитным сопротивлением утечки. В пределах временных интервалов  $2U_{\text{вых}} > U_{\text{пор}}^n$  и сопротивление определяется сопротивлением канала открытого транзистора.

Из сопоставления эпюры напряжения питания (см. рис.2,б) и графика качественной зависимости периодического изменения сопротивления транзистора (см. рис.2,з) видно, что максимум напряжения питания совпадает с минимумом сопротивления транзистора  $T_2$ , а минимум – с его высоким значением ( $R_{T_2} \rightarrow \infty$ ), т.е. напряжение питания и сопротивление транзистора изменяются в противофазе. Поэтому в течение временных интервалов 2 транзистор  $T_2$  шунтирует выходную емкость  $C_{n2}$  и на выходе второго инвертора ( $T_2, C_{02}$ ) формируется уровень логического «0» в виде напряжения, амплитуда которого много меньше  $U_{dd}^{\text{max}}$  (рис.2,д). Если подбором параметров транзистора  $T_2$  и параметров переменного напряжения  $\sim U_{dd}$  обеспечить выполнение соотношения  $U_{\text{вых2}} < U_{\text{пор}}^n$ , то напряжение на выходе в пределах временных интервалов 2 можно считать логическим «0» для инверторов КТЛ-типа. В течение временных интервалов 1 транзистор  $T_2$  закрыт, поскольку  $U_{\text{вх2}} < U_{\text{пор}}^n$ , и не оказывает шунтирующего воздействия на выходную емкость  $C_{n2}$ , но напряжение на выходе будет оставаться низким, поскольку переменное напряжение питания принимает в это время минимальное (или близкое к минимальному) значение. Таким образом, второй инвертор в цепи (см. рис.2,а) инвертирует входное напряжение и напряжение на его выходе близко к напряжению общей шины в любой момент времени. Это напряжение подается на вход третьего инвертора ( $T_3, C_{03}$ ), который работает аналогично первому. На его входе будет логическая «1» в виде переменного напряжения, идентичного напряжению питания  $\sim U_{dd}$ . Четвертый инвертор работает аналогично второму. Таким образом, информация передается по логической цепи из элементов КТЛ-типа.

По принципу действия КТЛ является логикой квазистатического типа. Логические переменные могут быть представлены или непрерывными гармоническими (синусоидальными) сигналами или импульсными последовательностями (например, в виде меандра). Способ представления логической «1» определяется видом временной функции напряжения питания  $\sim U_{dd}$ . Итак, в отличие от статической логики, где логическая «1» кодируется уровнем постоянного напряжения и источник питания представляет собой источник постоянного напряжения, в квазистатической логике «1» кодируется переменным напряжением.

Логический «0» в обоих случаях кодируется постоянным напряжением, равным напряжению общей шины. При частоте  $f_{\text{вх}}$ , превышающей частоту питающего напряжения  $f_{\text{п}}$ , возможны сбои в работе схемы (рис.3).

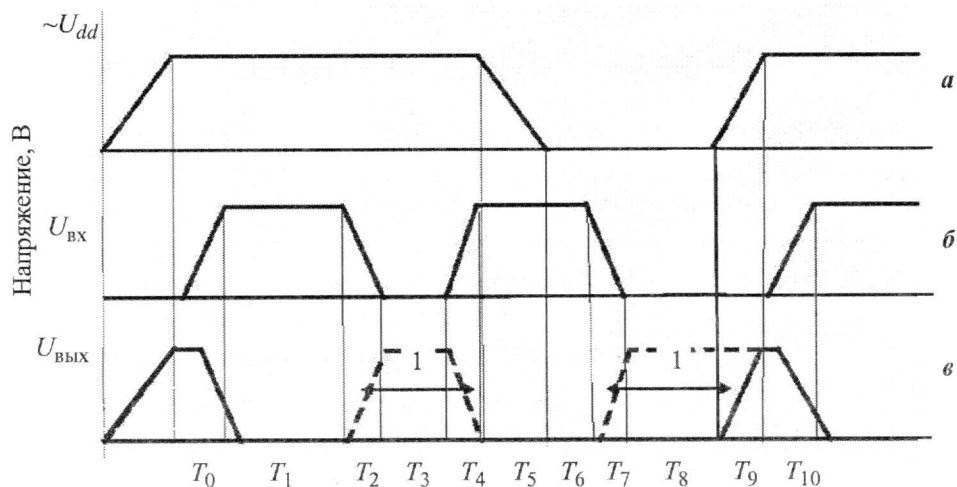


Рис.3. Временные диаграммы работы инвертора при  $f_{вх} > f_{п}$ : а – напряжение питания; б – входная переменная; в – выходное напряжение  $U_{вых}$ ; 1 – интервалы некорректной работы (пунктиром показаны импульсы напряжений, соответствующие таблице истинности инвертора)

В ходе дальнейшего исследования выявлены некоторые паразитные эффекты, возникающие в процессе работы конденсаторно-транзисторных элементов. Так, при подаче на вход инвертора напряжения логической «1» на выходе вместо ожидаемого напряжения логического «0» присутствуют всплески напряжения, соответствующие по временной шкале периодам нарастания и спада импульсов питания. Это обусловлено тем, что при открытых транзисторах переключающего блока их резистивность совместно с заряжающей емкостью образуют инерционную цепь (фактически фильтр верхних частот), которая и является причиной возникновения паразитных всплесков. Данного эффекта нельзя избежать, однако его влияние на работу схем может быть существенно уменьшено.

Наиболее простым методом решения проблемы является увеличение длительности фронтов импульсов питания, но в результате сильно ухудшается быстродействие вентиля и схем в целом. Более эффективным является метод изоляции нагрузочной емкости от резистивно-конденсаторной инерционной цепи в периоды нарастания и спада напряжения питания. Для этого необходимо разместить между средней точкой конденсаторно-транзисторного вентиля и нагрузочной емкостью проходной вентиль минимальных топологических размеров, который будет управляться специальным сигналом, вложенным в импульсы питания (вентиль  $M_3$  и сигнал *contr*, рис.1,б). Несмотря на то что данный метод требует введения дополнительной цепи питания и транзистора, он позволяет существенно увеличить функциональные возможности логического вентиля. Во-первых, увеличивается быстродействие схем, во-вторых, изоляция выходной емкости от конденсаторно-транзисторного делителя делает возможным создание последовательностных схем на элементах данного типа. Например, на элементах 2И-НЕ (см. рис.1,б) можно строить практически любые триггеры. По причине импульсного характера напряжения питания при отсутствии подобной изоляции информация на выходе логического элемента просто терялась бы в периоды, когда питание неактивно, что не позволяет строить схемы с памятью. Кроме того, данный метод практически не увеличивает общую энергию, потребляемую схемой, поскольку все выводы дополнительной шины питания будут подключены только к затворам МДП-транзисторов.

Другая проблема, обнаруженная в ходе исследования, – работа элементов на себе подобные. При непосредственном каскадировании фронты питающих импульсов у соседних каскадов совпадают. Это неизбежно приводит к тому, что проводимость канала транзистора меняется во время изменения напряжения питания. В результате появляются всплески большой амплитуды и импульсная последовательность уходит в отрицательную область напряжений. Для обеспечения неизменности проводимости канала во время нарастания (или спада) импульса напряжения питания он должен полностью перекрываться входным импульсом. Однако если в схеме действует только одно питающее напряжение, это условие невыполнимо. Поэтому разработан метод двухшинной организации цепей питания. Его суть в следующем: вся схема делится на четные и нечетные уровни логики, каждый уровень питается от своей шины питания (рис.4,а). При этом выход элемента может быть соединен только с входом элемента с другого уровня четности. Это правило сохраняет силу и в отношении последовательностных схем, где по причине наличия обратных связей невозможно четко разделить схему на дискретные логические уровни. Не допускаются соединения элементов с уровнем одинаковой четности и внутри одного уровня (на рис.4,а соединение обозначено крестиком). Шины питания должны быть синхронизированы таким образом, чтобы фронты напряжений питания для соседних вентилях были разнесены во времени (рис.4,б). Отметим, что для каждой шины питания требуется свой контролирующий сигнал.

Такой подход позволяет строить комбинационные и последовательностные схемы любой конфигурации. При этом в схеме должны присутствовать минимум два питающих сигнала и такое же количество сигналов контроля, вместо одного сигнала питания в обычной КМОП-логике. Однако для современных технологий с большим количеством допустимых для разводки слоев металла такое увеличение количества питающих шин не должно стать критичным фактором.

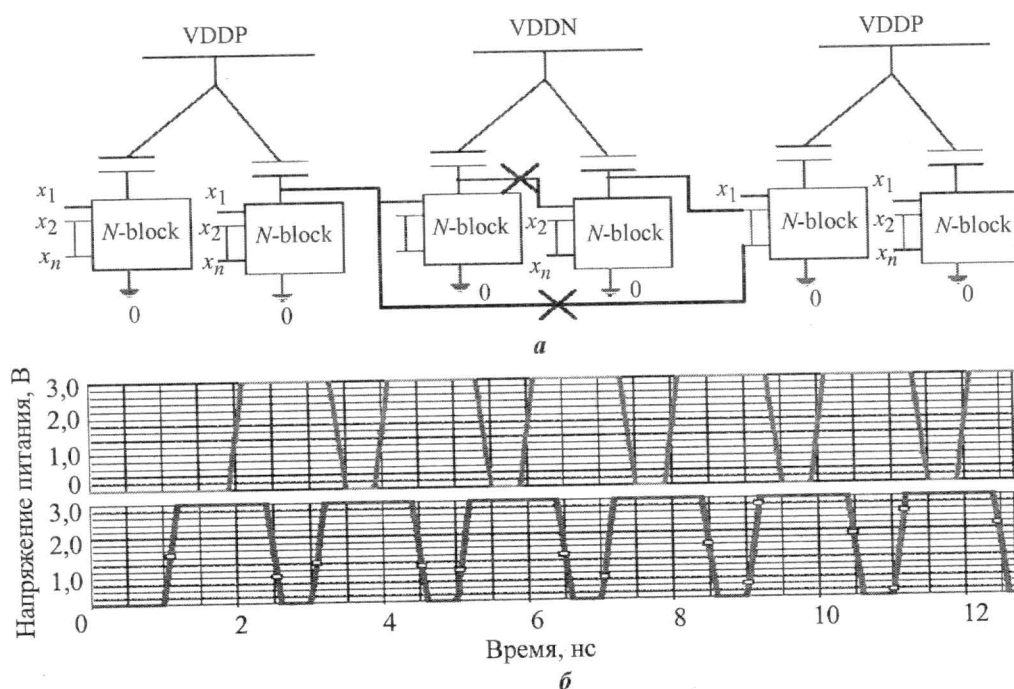


Рис.4. Двухшинная организация цепей питания: а – разбиение на логические уровни; б – синхронизация питающих сигналов

Несмотря на такие недостатки, как неполный размах логических уровней и заведомо большое количество шин питания, конденсаторно-транзисторные элементы могут оказаться весьма перспективной элементной базой. Благодаря использованию транзисторов одного типа проводимости они более технологичны, а следовательно, дешевле КМОП-схем. Кроме того, реверсивное переключение позволяет потреблять значительно меньше энергии. Этот факт наглядно иллюстрируют результаты моделирования зависимости энергии переключения от величины напряжения питания для схем сумматора и D-триггера по сравнению с аналогичными устройствами в КМОП-исполнении (рис.5). Преимущество более очевидно при больших значениях напряжения питания, что позволило бы строить маломощные схемы на высоких напряжениях питания, тем самым увеличивая их помехоустойчивость и электрические характеристики.

Уменьшение габаритов и стоимости изделий невозможно без уменьшения энергопотребления и удешевления технологии производства схем. Конденсаторно-транзисторная логика может составить конкуренцию КМОП в таких устройствах, как мобильные телефоны, ноутбуки, цифровая фото- и видеоаппаратура.

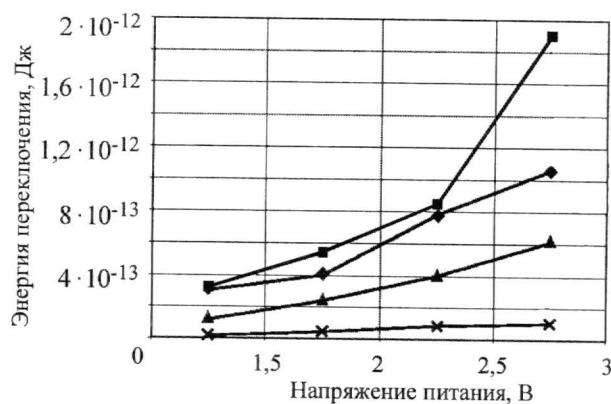


Рис.5. Зависимость энергии переключения от величины напряжения питания:  $\blacklozenge$  – КТЛ (D-триггер);  $\blacksquare$  – КМОП (D-триггер);  $\blacktriangle$  – КМОП (сумматор);  $\times$  – КТЛ (сумматор)

### Литература

1. Караханян Э.Р. Динамические элементы со структурой МДП. – М.: Сов. радио, 1979.
2. Tanzawa T., Tanaka T. A dynamic analysis of the Dickson charge pump circuits // IEEE J. Solid State Circuits. – 1997. – Aug. – Vol. 32. – P. 1231–1240.
3. Wu J.-T., Chang K.-L. MOS charge pumps for low-voltage operation // IEEE J. Solid State Circuits. – 1998. – Vol. 33, № 4. – P. 592–597.

Статья поступила  
19 июля 2007 г.

**Кремлев Вячеслав Яковлевич** (1939–2005) – доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и конструирования интегральных микросхем МИЭТ. Ученый в области физики и разработки полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Автор 150 научных трудов и более 200 патентов и изобретений.

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

**Николаев Артем Валерьевич** – аспирант кафедры интегральной электроники и микросистем МИЭТ. *Область научных интересов:* элементная база цифровых схем.



# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.396.967: 629.735.33

## Дифференциальный радиоконтраст в задачах оценки качества радиолокационных изображений

*В.Н. Четверик*

ГУП научно-производственный центр «ЭЛСОВ» (г. Москва)

Рассмотрены вопросы использования дифференциального радиоконтраста при оценке качества радиолокационных изображений в РЛС с синтезированной апертурой антенны (РСА). Дан вывод соотношений, позволяющих оценивать радиометрическую разрешающую способность РСА на основе статистического подхода к дифференциальному радиоконтрасту. Приведены графики, позволяющие проанализировать влияние основных параметров РСА на радиометрическую разрешающую способность.

В последнее время для дистанционного зондирования Земли используются РЛС с синтезированной апертурой антенны (РСА) [1]. Одной из основных характеристик РСА в задачах дистанционного зондирования Земли наряду с пространственной разрешающей способностью стала радиометрическая разрешающая способность, которая характеризует возможность различать на радиолокационном изображении распределенные объекты, отличающиеся по удельной эффективной площади рассеяния [2, 3]. В [4] эта характеристика РСА подробно обсуждена, однако научные дискуссии на тему радиометрического разрешения продолжаются [4–6]. В настоящей статье делается попытка статистического обоснования определения радиометрической разрешающей способности на основе дифференциального радиоконтраста.

При выборе критерия обнаружения радиоконтраста элементов радиолокационного изображения необходимо учитывать следующие соображения. Во многих работах, посвященных обнаружению целей с помощью РСА, при расчете вероятности обнаружения используется критерий Неймана–Пирсона, где радиояркость отметок от целей сравнивается с некоторым порогом, установленным по заданному уровню ложных тревог [1]. Этот критерий традиционно применяется для оценки характеристик обнаружения целей в автоматических устройствах с жестким или адаптивным порогом. В случае, когда изображение анализируется оператором-дешифровщиком на видеоконтрольном устройстве или на твердой копии изображения, подобный подход представляется излишне жестким. Во-первых, известно, что человек значительно точнее оценивает разность яркостей, чем их абсолютную величину. Во-вторых, на видеоконтрольном устройстве, динамический диапазон которого значительно меньше динамического диапазона радиолокационного изображения (РЛИ), нет возможности поддерживать заданный уровень ложных тревог. По аналогичным причинам к задаче оценки параметров РЛИ с помощью оператора-дешифровщика неприменим и критерий идеального наблюдателя [7], который также предполагает сравнение радиояркостей с фиксированным порогом.

Разумной альтернативой в условиях обработки РЛИ оператором является формулировка критерия, основанного на обнаружении определенной разности радиояркостей элементов изображения. Такой метод естественно назвать методом обнаружения по дифференциальному радиоконтрасту.

Для оценки вероятности обнаружения различия радиояркостей на отдельных фрагментах РЛИ используем плотности распределения вероятностей разности двух случайных величин, каждая из которых представляет радиояркость соответствующего фрагмента РЛИ.

Известно [8], что если имеются плотности распределения двух независимых случайных величин  $\xi_1$  и  $\xi_2$ , которые обозначим соответственно  $W_{\xi_1}(x)$  и  $W_{\xi_2}(x)$ , то функция распределения разности  $\eta = \xi_1 - \xi_2$  имеет вид

$$W_{\eta}(y) = \int_{-\infty}^{\infty} W_{\xi_1}(x) W_{\xi_2}(x-y) dx, \quad -\infty < y < \infty. \quad (1)$$

В силу того, что рассматриваются распределения радиояркостей, которые есть величины положительные, имеем:

$$W_{\xi_1}(x) = 0 \text{ при } x < 0,$$

$$W_{\xi_2}(x) = 0 \text{ при } x < 0.$$

Теперь можно уточнить пределы интегрирования в (1):

$$W_{\eta}(y) = \int_E^{\infty} W_{\xi_1}(x) W_{\xi_2}(x-y) dx, \quad (2)$$

где  $E = y$  при  $y \geq 0$ ;  $E = 0$  при  $y < 0$ .

Отметим, что распределение (2), описывающее разность радиояркостей, не равно нулю в области отрицательных значений аргумента  $y$ . Естественно также, что для этого распределения должно выполняться условие нормировки:

$$\int_{-\infty}^{\infty} W_{\eta}(y) dy = 1. \quad (3)$$

Предположим теперь, что математическое ожидание случайной величины  $\xi_1$  больше математического ожидания случайной величины  $\xi_2$ . Тогда математическое ожидание их разности  $M_{\eta} = M_{\xi_1} - M_{\xi_2}$  есть величина положительная, а вероятность правильного решения, что  $\xi_1 > \xi_2$ , равна

$$P_{\text{обн}} = \int_0^{\infty} W_{\eta}(y) dy. \quad (4)$$

Таким образом, для нахождения вероятности правильного обнаружения разности яркостей двух элементов РЛИ нужно найти распределение (2) и проинтегрировать его по всем положительным значениям аргумента. Назовем эту вероятность «вероятностью правильного обнаружения по дифференциальному радиоконтрасту».

В рассматриваемом случае вероятность ошибочного решения, т.е. заключения, что  $\xi_1 < \xi_2$ , составляет с  $P_{\text{обн}}$  полную группу событий и равна

$$P_{\text{ош}} = 1 - P_{\text{обн}} \quad (5)$$

или с учетом (3) и (4):

$$P_{\text{ош}} = \int_{-\infty}^0 W_{\eta}(y) dy. \quad (6)$$

Математическому выражению вероятности правильного обнаружения по дифференциальному радиоконтрасту можно придать и другую форму.

Подставив (2) в (6) и изменив порядок интегрирования, получаем:

$$P_{\text{ош}} = \int_0^{\infty} W_{\xi_1}(x) \left[ \int_{-\infty}^0 W_{\xi_2}(x-y) dy \right] dx. \quad (7)$$

Проведя во внутреннем интеграле замену переменных  $z = x - y$ , имеем:

$$\int_{-\infty}^0 W_{\xi_2}(x-y) dy = \int_x^{\infty} W_{\xi_2}(z) dz = \int_0^{\infty} W_{\xi_2}(z) dz - \int_0^x W_{\xi_2}(z) dz. \quad (8)$$

Из условия нормировки первый интеграл в (8) равен единице:  $\int_0^{\infty} W_{\xi_2}(z) dz = 1$ .

После подстановки (8) в (7) получаем:

$$P_{\text{ош}} = \int_0^{\infty} W_{\xi_1}(x) dx - \int_0^{\infty} W_{\xi_1}(x) \left[ \int_0^x W_{\xi_2}(z) dz \right] dx = 1 - \int_0^{\infty} W_{\xi_1}(x) \left[ \int_0^x W_{\xi_2}(z) dz \right] dx. \quad (9)$$

Теперь, используя (5), вернемся к вероятности правильного обнаружения:

$$P_{\text{обн}} = \int_0^{\infty} W_{\xi_1}(x) \left[ \int_0^x W_{\xi_2}(z) dz \right] dx. \quad (10)$$

Поскольку внутренний интеграл в (10) есть функция распределения случайной радиояркости элемента  $\xi_2$ :

$$F_{\xi_2}(x) = \int_0^x W_{\xi_2}(z) dz,$$

можно записать

$$P_{\text{обн}} = \int_0^{\infty} W_{\xi_1}(x) F_{\xi_2}(x) dx.$$

Таким образом, вероятность обнаружения разности радиояркости двух элементов РЛИ равна интегралу от нуля до бесконечности от произведения плотности вероятностей большей радиояркости на функцию распределения меньшей радиояркости.

Теперь, используя метод дифференциального радиоконтраста, рассмотрим решение задачи анализа радиометрического разрешения РСА, т.е. возможности различения с заданной вероятностью двух фрагментов РЛИ с близкими значениями удельной эффективной поверхности рассеяния (УЭПР).

Можно показать [1, 2], что для статистически однородной земной поверхности закон распределения суммарной мощности отраженного сигнала и теплового шума на выходе РСА в элементах пространственного разрешения (в предположении, что размеры этих элементов существенно больше длины волны зондирующего сигнала) в большинстве случаев близок к экспоненциальному распределению:

$$W_1(y) = \frac{1}{B_{\text{ш}}(1+\rho_{\text{ф}})} \exp\left(-\frac{y}{B_{\text{ш}}(1+\rho_{\text{ф}})}\right), \quad y \geq 0, \quad (11)$$

где  $\rho_{\text{ф}} = \frac{B_{\text{ф}}}{B_{\text{ш}}}$  – отношение фон/шум;  $B_{\text{ф}}$  – мощность (радиояркость) элемента фона, пропорциональная УЭПР фона  $\sigma_0$ ;  $B_{\text{ш}}$  – мощность (радиояркость) собственного шума РСА.

Приведенные в [9] результаты денситометрического анализа изображений, полученных с помощью РСА SEASAT-1 по однородной морской поверхности, показали отличное совпадение закона распределения интенсивностей (радиояркостей) с экспоненциальным. Формула (11) описывает закон распределения радиояркостей одного, отдельно взятого, элемента радиоизображения. Если рассматривать все элементы РЛИ в совокупности, то получим двумерную матрицу случайных радиояркостей, каждый пиксель которой описывается этим законом. В работе [10] показано, что для однородной диффузно отражающей поверхности пространственная корреляция смежных элементов пространственного разрешения РЛИ практически отсутствует, что позволяет рассматривать статистические свойства элементов матрицы пикселей РЛИ независимо.

В более общем случае при  $N$  некогерентных накоплениях независимых реализаций РЛИ плотности вероятностей радиояркостей двух фрагментов одного изображения, отличающихся средними значениями УЭПР (отношениями фон/шум  $\rho_{\text{ф1}} > \rho_{\text{ф2}}$ ) описываются законом Эрланга:

$$W_{\xi_{1N}}(y) = \frac{1}{(N-1)!} \cdot \frac{y^{N-1}}{B_{\text{ш}}(1+\rho_{\text{ф1}})^N} \cdot e^{-\frac{y}{B_{\text{ш}}(1+\rho_{\text{ф1}})}}, \quad y \geq 0. \quad (12)$$

$$W_{\xi_{2N}}(y) = \frac{1}{(N-1)!} \cdot \frac{y^{N-1}}{B_{\text{ш}}(1+\rho_{\text{ф2}})^N} \cdot e^{-\frac{y}{B_{\text{ш}}(1+\rho_{\text{ф2}})}}, \quad y \geq 0. \quad (13)$$

Плотность вероятностей разности радиояркостей  $\eta = \xi_1 - \xi_2$  ( $\eta > 0$ ) находится подстановкой (12) и (13) в формулу (2).

Итоговый закон распределения разности радиояркостей имеет вид

$$W_{\eta}(y) = \frac{1}{(N-1)!} \frac{1}{(\sigma_1 + \sigma_2)^N} \exp\left(-\frac{y}{\sigma_1}\right) \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \left[ \frac{\sigma_1 \sigma_2}{(\sigma_1 + \sigma_2)} \right]^k \frac{(N-1+k)!}{k!(N-1-k)!} y^{N-1-k} \quad \text{при } y \geq 0, \quad (14)$$

$$W_{\eta}(y) = \frac{1}{(N-1)!} \frac{1}{(\sigma_1 + \sigma_2)^N} \exp\left(\frac{y}{\sigma_2}\right) \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \left[ \frac{\sigma_1 \sigma_2}{(\sigma_1 + \sigma_2)} \right]^k (-1)^{N-1-k} \frac{(N-1+k)!}{k!(N-1-k)!} y^{N-1-k} \quad \text{при } y < 0,$$

где для сокращения записи введены следующие обозначения:  $\sigma_1 = B_{\text{ш}}(1+\rho_{\text{ф1}})$ ;  $\sigma_2 = B_{\text{ш}}(1+\rho_{\text{ф2}})$ .

Вероятность правильного обнаружения разности радиояркостей участков фона земной поверхности с различными коэффициентами отражения по критерию дифференциального радиоконтраста определяется по формуле (4), в которую необходимо подставить распределение (14) при  $y \geq 0$ .

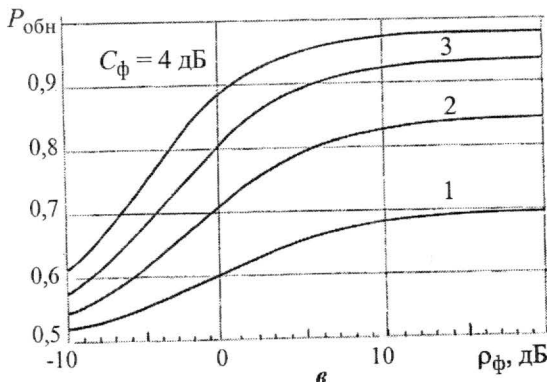
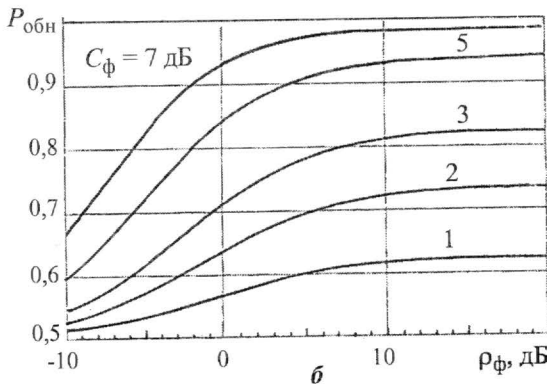
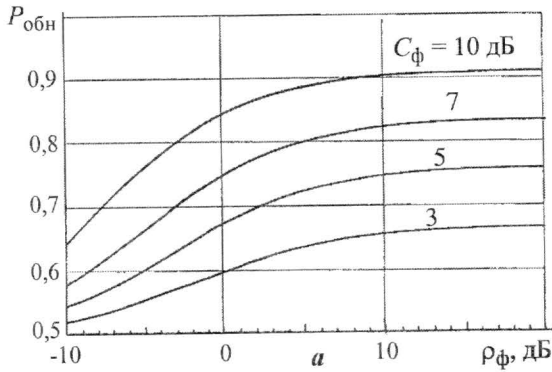
Проделив необходимые вычисления, получаем

$$P_{\text{обн}} = \frac{1}{(N-1)!} \left[ \frac{1 + C_{\Phi} \rho_{\Phi}}{2 + (1 + C_{\Phi}) \rho_{\Phi}} \right]^N \sum_{k=0}^{N-1} \left[ \frac{1 + \rho_{\Phi}}{2 + (1 + C_{\Phi}) \rho_{\Phi}} \right]^k \frac{(N-1+k)!}{k!}, \quad (15)$$

где  $C_{\Phi} = \frac{B_{\Phi 1}}{B_{\Phi 2}}$  – радиоконтраст фрагментов фона земной поверхности с разной УЭПР;

$\rho_{\Phi} = \frac{B_{\Phi 2}}{B_{\text{ш}}}$  – отношение фон/шум для элемента с меньшей УЭПР  $\xi_2$ .

Введенная величина радиоконтраста  $C_{\Phi}$ , рассматриваемая совместно с показателем вероятности его обнаружения, при оценке по дифференциальному радиоконтрасту и есть радиометрическое разрешение РСА по фону.



Вероятность обнаружения радиоконтраста  $C_{\Phi}$  участков фона земной поверхности с различными значениями УЭПР: а –  $N=1$ ; б –  $N=4$ ; в –  $N=10$

Отметим, что вероятность правильного обнаружения радиоконтраста участков фона земной поверхности, как следует из формулы (15), зависит от трех параметров: радиоконтраста  $C_{\Phi}$ , отношения фон/шум  $\rho_{\Phi}$  и числа некогерентных накоплений  $N$ .

Графики зависимости вероятности правильного обнаружения заданного радиоконтраста для числа некогерентных накоплений независимых РЛИ  $N=1, 4, 10$  приведены на рисунке.

При  $N=1$  выражение (15) имеет простой вид

$$P_{\text{обн}} = \left( 1 + \frac{1 + \rho_{\Phi}}{1 + C_{\Phi} \rho_{\Phi}} \right)^{-1} \quad (16)$$

Из формулы (16) можно получить соотношение для расчета параметра радиометрического разрешения  $\delta_r$  в явном виде:

$$\delta_r = C_{\Phi} = \frac{P_{\text{обн}}}{1 - P_{\text{обн}}} \cdot \frac{1 + \rho_{\Phi}}{\rho_{\Phi}} - \frac{1}{\rho_{\Phi}},$$

которое при больших отношениях сигнал/шум ( $\rho_{\Phi} \rightarrow \infty$ ) принимает вид

$$\delta_r = C_{\Phi} = \frac{P_{\text{обн}}}{1 - P_{\text{обн}}}. \quad (17)$$

Из последнего соотношения следует, что если задаться вероятностью правильного обнаружения радиоконтраста на уровне 0,667 (который является характерным для определения радиометрической чувствительности с



помощью параметра шумового эквивалента УЭПР  $\sigma_{\text{ш.э.}}$ , рассматриваемого при  $\rho_{\text{ф}} = 1$ ), то обнаруживаемый радиоконтраст будет равен  $C_{\text{ф}} = 2,0$  или 3 дБ. Это наилучшее достижимое значение радиометрического разрешения при оценке по дифференциальному радиоконтрасту и отсутствии некогерентных накоплений.

Из графиков на рисунке следует, что увеличение отношения фон/шум  $\rho_{\text{ф}}$  свыше 10 дБ практически не дает улучшения радиометрического разрешения. Это объясняется наличием в РЛИ характерного для РСА мультипликативного спекл-шума. Основной мерой увеличения радиометрического разрешения и вероятности обнаружения участков фона с различной ЭПР является увеличение числа  $N$  некогерентно суммируемых независимых реализаций радиолокационных изображений одного и того же сюжета, что соответствует [11]. В частности, увеличение числа некогерентных накоплений  $N$  с 1 до 10 позволяет при  $P_{\text{обн}} = 0,667$  и  $\rho_{\text{ф}} = 1$  улучшить радиометрическое разрешение с 4,8 до 1,5 дБ.

### Литература

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования земли: Учеб. пособие для вузов / Под ред. Г.С.Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
2. Неронский Л.Б., Михайлов В.Ф., Брагин И.В. Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны. Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования поверхности Земли и атмосферы: Учеб. пособие. – СПб.: С-ПГУАП, 1999. – 220 с.
3. Злобин В.К., Еремеев В.В. Обработка аэрокосмических изображений. – М.: Физматлит, 2006. – 288 с.
4. Brooks S.R. and Miller P.F. The influence of radiometric resolution on synthetic aperture radar design parameters // ESA SEASAT Workshop, ESA SP-154, 1979.
5. Oliver P, Vidal-Madjar D. Empirical estimation of the ERS-1 SAR radiometric resolution // Int. J. Remote Sens. – 1994. – Vol. 15. – P. 1109.
6. Florence Tupin, Michel Roux. Markov random field on region adjacency graph for the fusion of SAR and optical data in radargrammetric applications // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2005. – Vol. 43, N 8, August.
7. Frost V.S. Probability of error and radiometric resolution for target discrimination in radar images // IEEE Trans. Geosc. and Remote Sens. – 1984. – Vol. 22, N 2. – P. 121–125.
8. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн.1. – М.: Сов. радио, 1966. – 285 с.
9. Herland E.A. Application of satellite based sidelooking radar in maritime surveillance. Norwegian Defence Research Establishment, report 82/1001. September, 1982. – P. 3–18.
10. Школьный Л.А., Глазков С.Л., Шрамко В.М. Цифровое моделирование процесса формирования радиолокационного изображения диффузной поверхности в РСА // НММ по импульсной технике и дискретной обработке информации. – М.: ВВИА им. Н.Е.Жуковского, 1984. – С. 68–76.
11. Moore R.K. Tradeoff Between Picture Element Dimensions and Noncoherent Averaging in Side-Looking Airborne Radar // IEEE Trans. On Aerospace and Electronic Systems. – 1979. – Vol. AES-15, N 5. Sept. – P. 697–708.

Статья поступила  
28 сентября 2007 г.

**Четверик Владимир Николаевич** – генеральный директор ГУП НПЦ «ЭЛСОВ» (г. Москва). Область научных интересов: космическая связь, космическая радиолокация.

# Аппаратная реализация одномерного медианного фильтра с модульной архитектурой

А.Л.Переверзев

Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)

Разработана архитектура одномерного медианного фильтра, позволяющая увеличивать длину апертуры путем добавления однотипных модулей и вычислять медиану на каждом такте работы фильтра. Получено синтезируемое Verilog-описание предложенной архитектуры.

Благодаря свойству сглаживания импульсного шума при сохранении перепадов (резких изменений уровня сигнала) медианная фильтрация [1, 2] находит все большее применение в системах, работающих в режиме реального времени, в которых требуется эффективная обработка сигналов на фоне импульсных помех. Как правило, при фильтрации сигналов в режиме реального времени возникает необходимость в аппаратном проектировании различных типов фильтров. Отметим, что литературы, посвященной аппаратной реализации медианных фильтров [3], немного, некоторые оригинальные решения рассмотрены в описаниях изобретений [4, 5]. Анализ описанных в литературе схем позволил выделить два наиболее часто встречающихся недостатка: вычисление медианы за несколько тактов; относительно высокая ресурсоемкость, обусловленная большим количеством схем сравнения и сложной логической обработкой (при длине апертуры больше, либо равной пяти отсчетам).

В настоящей работе предложена архитектура одномерного медианного фильтра, позволяющая увеличивать длину апертуры путем наращивания структуры устройства добавлением однотипных модулей и вычислять медиану на каждом такте работы схемы. Такой подход дает возможность построить медианный фильтр с произвольной длиной апертуры и обеспечивает линейный рост аппаратных затрат при увеличении длины апертуры.

Функциональная схема медианного фильтра с предлагаемой архитектурой приведена на рис.1. Схема состоит из  $l$ -разрядных регистров  $RG_1$ – $RG_N$  и однотипных модулей  $M_1$ – $M_N$ , где  $N = (2k - 1)$  – длина апертуры,  $k$  – натуральное число больше единицы. В общем случае  $N$  может быть четным числом, тогда медианой считают среднее арифметическое двух средних членов упорядоченной последовательности [2]. Однако при аппаратной реализации фильтра это ведет к неоправданному усложнению схемы, поэтому на практике  $N$  выбирают нечетным.

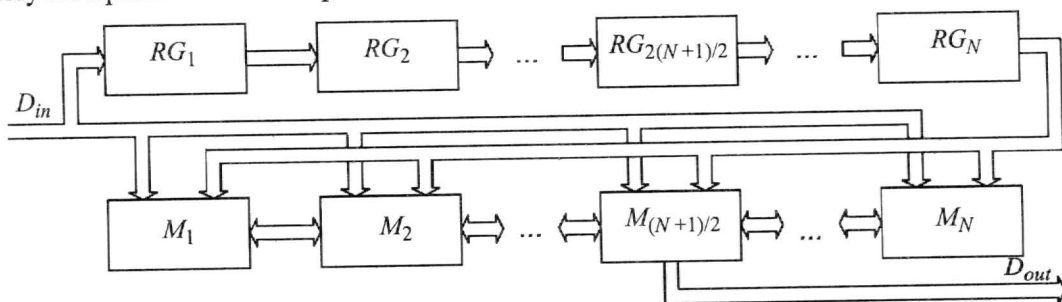


Рис.1. Функциональная схема медианного фильтра с модульной архитектурой

Регистры  $RG_1$ – $RG_N$  образуют линию задержки отсчетов входного сигнала на  $N$  тактов, т.е. в регистре  $RG_N$  хранится отсчет, который должен покинуть апертуру фильтра на следующем такте.

На рис.2 представлена функциональная схема  $i$ -го модуля, основу которого составляет  $l$ -разрядный регистр  $RG$  с мультиплексированным входом параллельной загрузки и комбинационная схема (КС). Регистр  $RG$  может принимать данные  $D_{in}$  со входа фильтра или данные  $M_{i-1}$ ,  $M_{i+1}$  от двух соседних модулей, а также хранить текущее значение. Решение о том, какой источник информации использовать, принимается КС на каждом такте работы устройства на основе результатов сравнений  $D_{in} > M_i$ ,  $RG_N = M_i$  и двух пар сигналов  $a_5$ ,  $a_2$  и  $a_4$ ,  $a_3$ , которые формируются КС двух соседних модулей (справа и слева соответственно).

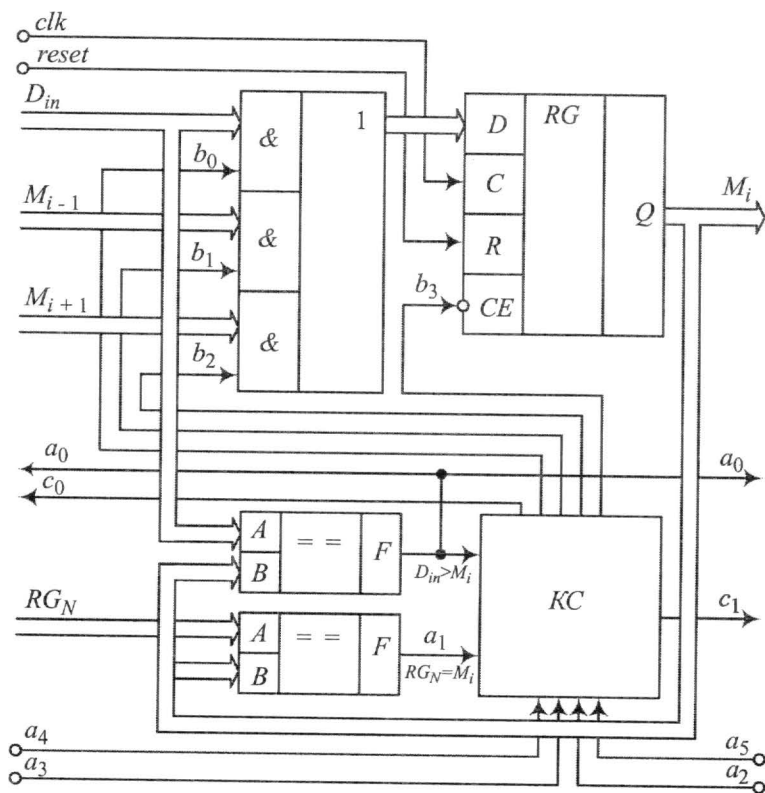


Рис.2. Функциональная схема модуля  $M_i$

Алгоритм работы фильтра заключается в упорядочивании отсчетов по возрастанию методом вставки [6]. В начальный момент времени по сигналу *reset* все регистры схемы обнуляются. После этого данные в цепочке регистров в модулях  $M_1$ – $M_N$  можно считать упорядоченными. Далее на каждом такте работы схемы по шине  $D_{in}$  в параллельном  $l$ -разрядном коде поступает очередной отсчет, происходит вычисление медианы (упорядочивание по возрастанию) и результат выдается на шину  $D_{out}$ . Для упорядочивания отсчетов методом вставки данные со входа фильтра необходимо поместить в регистр одного из модулей  $M_1$ – $M_N$ . Для этого требуются пересылки данных между соседними модулями. Управление пересылками данных осуществляется на основе логической обработки результатов пар сравнений  $D_{in} > M_i$ ,  $RG_N = M_i$  и сигналов  $a_5$ ,  $a_2$  и  $a_4$ ,  $a_3$  от

двух соседних модулей. Запись нового отсчета в регистр  $i$ -го модуля и необходимые пересылки данных между соседними модулями производятся одновременно. Согласно методу вставки отсчеты, хранящиеся в регистрах модулей  $M_1-M_N$ , всегда упорядочены, т.е. медиана всегда содержится в регистре модуля с номером  $(N+1)/2$ .

Определим сигналы  $a_5-a_0$  и синтезируем КС  $i$ -го модуля. Обозначим результаты сравнения содержимого регистра  $i$ -го модуля с отсчетами  $D_{in}$  и  $RG_N$

$$a_0 = \begin{cases} 1, & \text{если } D_{in} > M_i, \\ 0 & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (1)$$

$$a_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } RG_N = M_i, \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (2)$$

соответственно.

Для упорядочивания отсчетов необходима информация о том, с какой стороны от  $i$ -го модуля находится модуль, содержащий в регистре число, равное  $RG_N$ : справа

$$a_2 = \begin{cases} 1, & \text{если } RG_N = M_{i+1} \text{ или } RG_N = M_{i+2}, \text{ или } \dots RG_N = M_N, \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (3)$$

или слева

$$a_3 = \begin{cases} 1, & \text{если } RG_N = M_{i-1} \text{ или } RG_N = M_{i-2}, \text{ или } \dots RG_N = M_1, \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (4)$$

Составим таблицу, в которой представлены номер набора – десятичный эквивалент двоичного набора четырех переменных  $a_3, a_2, a_1, a_0$ , собственно набор этих четырех переменных и соответствующее этому набору содержимое регистра  $M_i$  (табл.1).

Наборы с номерами 0, 1, 12, 13 соответствуют невозможным ситуациям. В первых двух случаях одновременно равны нулю  $a_1, a_2, a_3$ , т.е. ни в одном из регистров модулей  $M_i$  нет отсчета, значение которого совпадало бы с содержимым регистра  $RG_N$ . Для наборов с номерами 12, 13 и слева и справа от  $i$ -го модуля находятся модули, содержащие отсчеты, равные  $RG_N$ , но в то же время содержимое самого  $i$ -го модуля не равно  $RG_N$ . Это противоречит тому, что в регистрах модулей  $M_1-M_N$  отсчеты всегда упорядочены по возрастанию.

Наборам 5 и 8 соответствует сохранение текущего содержимого регистра. В первом случае текущее содержимое регистра модуля  $M_i$  меньше значения отсчета  $D_{in}$  ( $a_0 = 1$ ), при этом не равны значения отсчетов в регистрах  $M_i$  и  $RG_N$  ( $a_1 = 0$ ) и справа от  $M_i$  есть свободный модуль ( $a_2 = 1$ ), т.е. для упорядочивания отсчетов не требуется перемещать содержимое регистра  $M_i$ . Аналогичным образом получаем и для набора 8.

Наборам 7 и 15 соответствует прием содержимого регистра  $M_{i+1}$ . В обоих случаях содержимое регистра  $M_i$  меньше значения отсчета  $D_{in}$  ( $a_0 = 1$ ). При этом  $RG_N = M_i$  и  $RG_N = M_{i+1}$ , для упорядочивания требуется сдвиг влево, т.е. прием  $i$ -м модулем данных от  $i+1$ . Аналогичным образом получаем, что наборам 10 и 14 соответствует прием содержимого регистра  $i-1$  модуля.

Анализ наборов 2–4, 6, 9, 11 показывает, что информации, содержащейся в значениях переменных  $a_3, a_2, a_1, a_0$ , недостаточно для однозначного определения источника данных  $i$ -го модуля. Например, при комбинации набора 2 возможны два варианта:

- прием данных  $D_{in}$  со входа фильтра, когда содержимое  $i - 1$  модуля меньше отсчета  $D_{in}$ ;

- прием данных от  $i - 1$  модуля в остальных случаях.

При комбинации набора 3 также возможны два варианта:

- прием данных от  $i + 1$  модуля  $M_{i+1}$ , когда содержимое регистра модуля  $M_{i+1}$  меньше отсчета  $D_{in}$ ;

- прием данных  $D_{in}$  со входа фильтра в остальных случаях.

Определим переменные  $a_4, a_5$  с помощью следующих выражений:

$$a_4 = \begin{cases} 1, & \text{если } D_{in} > M_{i-1}, \\ 0 & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (5)$$

$$a_5 = \begin{cases} 1, & \text{если } D_{in} > M_{i+1}, \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (6)$$

и заполним табл.1 для наборов 2–4, 6, 9, 11. На основе табл.1 составим логические выражения из переменных  $a_3, a_2, a_1, a_0$ , определяющих источник данных для регистра  $i$ -го модуля (табл.2).

После объединения и минимизации получаем выражения для четырех переменных  $b_3, b_2, b_1, b_0$  (табл.3). Поскольку данные выражения получены на основе табл.1, то переменные  $b_3, b_2, b_1, b_0$  являются взаимоисключающими в том смысле, что в каждый момент времени единице может быть равна только одна из них. Сигналы  $b_2, b_1, b_0$  управляют схемой мультиплексирования данных, а сигнал  $b_3$  запрещает запись в регистр  $RG$ , когда нужно сохранить текущее значение регистра (см. рис.2).

Таблица 1

Источник данных для регистра  $i$ -го модуля

Номер набора	$a_3$	$a_2$	$a_1$	$a_0$	$M_i$
0	0	0	0	0	$x$
1	0	0	0	1	$x$
2	0	0	1	0	$\begin{cases} D_{in}, & \text{если } a_4 = 1, \\ M_{i-1}, & \text{если } a_4 = 0 \end{cases}$
3	0	0	1	1	$\begin{cases} M_{i+1}, & \text{если } a_5 = 1, \\ D_{in}, & \text{если } a_5 = 0 \end{cases}$
4	0	1	0	0	$\begin{cases} D_{in}, & \text{если } a_4 = 1, \\ M_{i-1}, & \text{если } a_4 = 0 \end{cases}$
5	0	1	0	1	$M_i$
6	0	1	1	0	$\begin{cases} D_{in}, & \text{если } a_4 = 1, \\ M_{i-1}, & \text{если } a_4 = 0 \end{cases}$
7	0	1	1	1	$M_{i+1}$
8	1	0	0	0	$M_i$
9	1	0	0	1	$\begin{cases} M_{i+1}, & \text{если } a_5 = 1, \\ D_{in}, & \text{если } a_5 = 0 \end{cases}$
10	1	0	1	0	$M_{i-1}$
11	1	0	1	1	$\begin{cases} M_{i+1}, & \text{если } a_5 = 1, \\ D_{in}, & \text{если } a_5 = 0 \end{cases}$
12	1	1	0	0	$x$
13	1	1	0	1	$x$
14	1	1	1	0	$M_{i-1}$
15	1	1	1	1	$M_{i+1}$

Таблица 2

Источник данных для регистра  $i$ -го модуля после минимизации

Выражение	Источник данных
$a_2 \overline{a_1} a_0 + \overline{a_2} \overline{a_1} \overline{a_0}$	$M_i$
$a_3 a_1 \overline{a_0}$	$M_{i-1}$
$a_2 a_1 a_0$	$M_{i+1}$
$\overline{a_3} \overline{a_2} \overline{a_0} + \overline{a_3} a_1 \overline{a_0}$	$\begin{cases} D_{in}, & \text{если } a_4 = 1, \\ M_{i-1} & \text{в остальных случаях} \end{cases}$
$\overline{a_3} \overline{a_2} a_0 + \overline{a_2} a_1 a_0$	$\begin{cases} M_{i+1}, & \text{если } a_5 = 1, \\ D_{in} & \text{в остальных случаях} \end{cases}$



Из выражений (3)–(6) видно, что каждый модуль должен передавать соседним модулям результаты сравнения  $D_{in} > M_i$ ,  $RG_N = M_i$ . Для этого  $i$ -й модуль (см. рис.2) формирует сигналы  $a_0$ ,  $c_1$ ,  $c_0$ , которые определяются согласно (3)–(6):  $c_0 = a_1 + a_2$ ,  $c_1 = a_1 + a_3$  и соединяются с соответствующими входами  $a_5$ ,  $a_4$ ,  $a_3$ ,  $a_2$   $(i-1)$ -го и  $(i+1)$ -го модуля согласно табл.4.

Таблица 3

Источник данных для регистра  $i$ -го модуля после преобразования

Выражение	Источник данных
$b_0 = (\overline{a_3}a_2 + \overline{a_3}a_1)a_4\overline{a_0} + (a_3\overline{a_2} + a_2\overline{a_1})a_5a_0$	$D_{in}$
$b_1 = a_3a_1\overline{a_0} + (a_2 + a_1)\overline{a_4}a_3\overline{a_0}$	$M_{i-1}$
$b_2 = a_2a_1a_0 + (a_3\overline{a_2} + \overline{a_2}a_1)a_5a_0$	$M_{i+1}$
$b_3 = a_2a_1a_0 + a_2\overline{a_1}a_0$	$M_i$

Таблица 4

Таблица соединения управляющих сигналов соседних модулей

Входы управления $i$ -го модуля	Источник информации
$a_2$	$c_0$ от $M_{i+1}$
$a_3$	$c_1$ от $M_{i-1}$
$a_4$	$a_0$ от $M_{i-1}$
$a_5$	$a_0$ от $M_{i+1}$

Из табл.4 видно, что сигналы  $a_4$ ,  $a_3$  не определены для  $M_1$  и  $a_5$ ,  $a_2$  не определены для  $M_N$ . Для корректной работы схемы необходимо:

- на вход  $a_2$  первого модуля и вход  $a_3$   $N$ -го модуля подать «0», поскольку в первом случае слева, а во втором – справа нет модуля, хранящего значение, равное содержимому регистра  $RG_N$ ;

- на вход  $a_4$  первого модуля подать «1», а на вход  $a_5$   $N$ -го модуля подать «0» исходя из того, что отсчеты в регистрах модулей  $M_1$ – $M_N$  упорядочены по возрастанию.

В табл.5 приведены сравнительные данные по аппаратным затратам на реализацию медианных фильтров с предложенной модульной архитектурой (структура 1) и со структурой, основанной на мультиплексировании данных в регистрах  $RG_1$ – $RG_N$  (структура 2) [3]. Зависимость количества компараторов от длины апертуры (рис.3) для двух структур медианного фильтра показывает, что модульная архитектура дает существенную экономию аппаратных ресурсов при длине апертуры больше 5.

Таблица 5

Сравнительные данные по аппаратным затратам на реализацию медианных фильтров

Элемент	Структура 1	Структура 2
$l$ -разрядный регистр, шт.	$2N$	$N$
$l$ -разрядный компаратор, шт.	$2N$	$\frac{N!}{2(N-2)!}$
$l$ -разрядный мультиплексор 2 в 1, шт.	$1,5N$	$N/2$

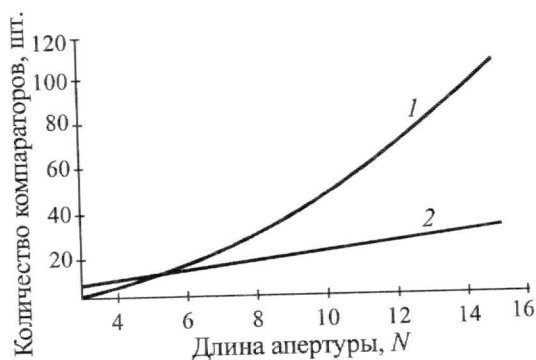


Рис.3. Зависимость количества компараторов от длины апертуры фильтра: 1 – структура, основанная на мультиплексировании данных; 2 – модульная архитектура

Практическая аппаратная реализация медианных фильтров с большими длинами апертуры (более 5 отсчетов) целесообразна на базе заказных или программируемых логических интегральных схем. С целью облегчения использования предложенной модульной архитектуры фильтра на различной элементной базе разработано синтезируемое Verilog-описание, позволяющее реализовать медианный фильтр с любой нечетной длиной апертуры. В табл.6 приведены данные по аппаратным затратам на реализацию модульной архитектуры на базе ПЛИС фирмы Xilinx серии Spartan3.

Таблица 6

**Аппаратные затраты на реализацию модульной архитектуры на базе ПЛИС фирмы Xilinx**

Количество отсчетов в апертуре фильтра	Количество конфигурируемых логических блоков
3	17
5	31
7	49
9	60

Таким образом, результатом данного исследования и проектирования является модульная архитектура одномерного медианного фильтра, реализованная в виде параметризуемого элемента, описанного на Verilog-HDL. Предложенная архитектура позволяет вычислять медиану на каждом такте работы схемы, обеспечивает линейный рост аппаратных затрат при увеличении длины апертуры, позволяет реализовывать фильтры с любой нечетной длиной апертуры на различной элементной базе.

**Литература**

1. Хуанг Т.С. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений. – М.: Радио и связь, 1984. – 224 с.
2. Vaseghi S.V. Advanced digital signal processing and noise reduction. – N.Y.: John Willey & sons, 2000. – 466 с.
3. Воробьев Н.В. Одномерный медианный фильтр с трехотсчетным окном // Chip News. – 1999. – № 9.
4. Фридман П.А. Цифровой медианный фильтр // Описание изобретения к патенту РФ № 4828474/24, Кл. G 06 F 17/18, 1995.
5. Секунов Н.Ю. Рекурсивный медианный фильтр // Описание изобретения к патенту РФ № 4844217/63, Кл. H 03 H 17/00, 1995.
6. Кнут Д.Э. Искусство программирования. – Киев: Вильямс, 2007. – Т. 3: Сортировка и поиск. – 832 с.

Статья поступила  
9 августа 2007 г.

**Переверзев Алексей Леонидович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИИ вычислительных средств и систем управления МИЭТ. *Область научных интересов:* цифровая обработка сигналов, проектирование специализированных цифровых вычислительных устройств и автоматизированных систем управления.

**Информация для читателей журнала**

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

Вы можете оформить подписку на 2008 г. в редакции с любого номера.

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

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

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

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

# МЕТОДЫ И ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 539.293, 621.315.592

## Использование фоторефрактивного эффекта для комплексного трехмерного локального измерения электрофизических и термических параметров кремниевых структур

А.Л.Филатов, А.В.Луговской

Институт радиотехники и электроники РАН

Исследован фоторефрактивный эффект в качестве основы для создания нового метода бесконтактного комплексного картирования электрофизических и термических свойств кремниевых структур. Показана возможность трехмерного локального измерения подвижности и времени жизни носителей заряда, а также коэффициента температуропроводности в одном технологическом цикле в любом месте объема образца. Разработана новая методика одновременного измерения всех этих параметров.

К настоящему времени разработаны и продолжают разрабатываться метрологические методы определения электрофизических [1, 2] и термических параметров [3, 4] полупроводников и полупроводниковых структур. Один из новых методов диагностики создан на базе фоторефрактивного эффекта [5, 6]. Этот эффект состоит в том, что при поглощении модулированного по интенсивности лазерного излучения накачки в объеме образца вблизи области поглощения периодически возникают градиенты концентрации фотовозбужденных носителей и температуры, которые приводят к периодическому возникновению фотоиндуцированной оптической неоднородности. Амплитудные и фазовые зависимости угла отклонения зондирующего лазерного луча на этой неоднородности от частоты модуляции излучения накачки и от расстояния между лучами несут информацию о параметрах этой неоднородности и, следовательно, о параметрах среды. Параметры лазерного излучения подбираются таким образом, чтобы излучение накачки слабо поглощалось, а зондирующее излучение практически не поглощалось в образце.

На базе фоторефрактивного эффекта созданы методы бесконтактного, локального определения времени жизни и коэффициента диффузии неосновных носителей заряда в кремнии [7] и коэффициента температуропроводности [8]. В настоящей работе рассматривается возможность совмещения этих методов для одновременного измерения электронных и термических параметров кремниевых структур в одном технологическом цикле.

**Теория.** В работе [6] описана теория фоторефрактивного эффекта и получена формула для вычисления угла фоторефрактивного отклонения  $\Theta$  зондирующего луча в полупроводниках при возбуждении лучом накачки, имеющим гауссово распределение с радиусом  $a$  и промоделированным с круговой частотой  $\omega$ :

$$\Theta = \begin{bmatrix} \Theta_x \\ \Theta_z \end{bmatrix} = C_1 \int_0^\infty d\xi \xi \begin{bmatrix} W(\xi, Z) & \sin(\xi) \\ \frac{\partial W(\xi, Z)}{\partial Z} & \cos(\xi) \end{bmatrix} \exp\left(-\frac{\xi^2 A^2}{4}\right),$$

$$\text{где } W(\xi, Z) = \frac{1 - \alpha(\eta^2 - B^2) + Q(\mu^2 - B^2)}{(\mu^2 - \eta^2)(\eta^2 - B^2)} \exp(-BZ) +$$

$$+ \frac{\sigma + B}{(\sigma + \mu)(\mu^2 - B^2)} \left( \alpha + \frac{1}{\mu^2 - \eta^2} \right) \exp(-\mu B) + \frac{\sigma}{\eta(\sigma + \mu)(\mu^2 - B^2)} \times$$

$$\times \left\{ \mu \left( 1 - \frac{1}{\mu^2 - \eta^2} \right) - B \left[ 1 + \frac{\mu}{\sigma(\mu^2 - \eta^2)} + \frac{\sigma + \mu}{\sigma(\mu^2 - B^2)} \left( 1 + Q \frac{\mu^2 - B^2}{\eta^2 - B^2} \right) \right] \right\} \exp(-\eta Z);$$

$$\alpha = - \frac{\chi}{E_g D} \left( \frac{\partial n^{opt}}{\partial n} \right) \left( \frac{\partial n^{opt}}{\partial T} \right)^{-1}; Q = \frac{h\nu - E_g}{\gamma E_g}, A = \frac{a}{L}; X = \frac{x}{L}; Z = \frac{z}{L}; \Omega_0 = \frac{\kappa}{D};$$

$$\sigma = S\sqrt{\tau/D}; \eta = \sqrt{\xi^2 - i\Omega/\Omega_0}; \mu = \sqrt{1 - i\Omega + \xi^2}; L = \sqrt{D\tau}; \Omega = \omega\tau; B = \beta L;$$

$\Theta$  – угол отклонения на оптической неоднородности;  $\Theta_x$  – проекция угла отклонения  $\Theta$ , перпендикулярная лучу накачки;  $\Theta_z$  – параллельная лучу накачки;  $C_1$  – константа;  $D$  – коэффициент амбиполярной диффузии;  $\tau$  – время жизни носителей;  $S$  – скорость поверхностной рекомбинации;  $E_g$  – ширина запрещенной зоны;  $\gamma$  – квантовый выход;  $h\nu$  – энергия квантов излучения накачки;  $\beta$  – коэффициент поглощения излучения накачки;  $n$  – концентрация фотовозбужденных носителей заряда;  $n^{opt}$  – коэффициент преломления;  $T$  – температура образца;  $\chi$  – коэффициент теплопроводности;  $\kappa$  – коэффициент температуропроводности;  $x$  – расстояние между лучами;  $z$  – расстояние от поверхности до исследуемой области.

Схема прохождения лазерных лучей в объеме образца показана на рис.1. Луч накачки, проходя на расстоянии  $z$  от поверхности образца, слабо поглощается в среде. Зондирующий луч проходит перпендикулярно к лучу накачки на расстоянии  $x$  от него и отклоняется на оптической неоднородности на угол  $\Theta$ , который имеет две компоненты:  $\Theta_x$  – перпендикулярно лучу накачки и  $\Theta_z$  – параллельно этому лучу. Величина  $\Theta_z$  определяется главным образом затуханием луча накачки в глубь образца. При слабом поглощении излучения накачки она значительно меньше величины  $\Theta_x$ , которая определяется в основном градиентами концентрации свободных носителей и температуры. Так как обе проекции угла отклонения несут примерно одинаковую информацию, то обычно ограничиваются только исследованием проекции угла  $\Theta_x$ .

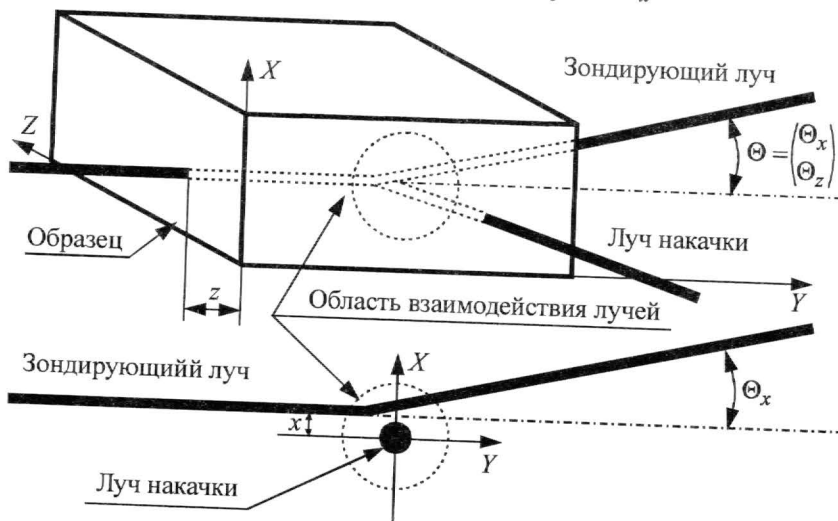


Рис. 1. Схема прохождения лучей в фоторефрактивных экспериментах

В случае, когда радиус луча накачки меньше характерных длин диффузии носителей и тепла ( $A \ll 1$ ), исследуемая область находится вдали от освещаемой поверхности ( $Z \gg 1$ ), характерная длина поглощения излучения накачки превосходит все другие характерные длины ( $B \ll 1$ ,  $\Omega_0/\Omega$ ), интеграл по  $\xi$  берется точно и для  $\Theta_x$  получается следующее выражение:

$$\Theta_x = C_2 \left\{ \left[ \alpha + \frac{\Omega_0}{\Omega_0 + i\Omega(1 - \Omega_0)} \right] \exp(-\mu_0 X) - \left[ Q + \frac{\Omega_0}{\Omega_0 + i\Omega(1 - \Omega_0)} \right] \exp(-\eta_0 X) \right\},$$

где  $\mu_0 = \sqrt{1 - i\Omega}$ ,  $\eta_0 = \sqrt{-i\Omega/\Omega_0}$ .

Здесь первое слагаемое – «электронная» компонента – обусловлено вкладом неравновесных носителей в оптической неоднородности (этот вклад пропорционален  $\alpha$ ) и выделением тепла при рекомбинации носителей. Второе слагаемое – «тепловая» компонента – связано с выделением тепла при термализации носителей (оно пропорционально  $Q$ ) и их рекомбинации. Обе компоненты уменьшаются экспонентно с расстоянием между лучами. «Электронная» компонента падает на эффективной длине амбиполярной диффузии:

$$L_{eff} = \sqrt{2D\tau(1 + \sqrt{1 + \Omega^2})},$$

а «тепловая» компонента – на эффективной длине амбиполярной диффузии:

$$L_T = \sqrt{2\kappa/\omega}.$$

Таким образом, оказывается возможным частотно разделить «электронную» и «тепловую» компоненты.

На высоких частотах, когда эффективная длина амбиполярной диффузии становится меньше длины тепловой диффузии, влияние электронных параметров образца на  $\Theta_x(\omega, x)$  становится определяющим. При этом формула для  $\Theta_x(\omega, x)$  еще больше упрощается:

$$\Theta_x(\omega, X) = C_3 \exp(-x/L_{eff} + ix/L_\phi), \text{ где } L_\phi = \sqrt{2D\tau(-1 + \sqrt{1 + \Omega^2})}.$$

Видно, что модуль измеряемого сигнала уменьшается с расстоянием с характерной длиной  $L_{eff}$ , а фаза сигнала изменяется линейно с наклоном  $L_\phi^{-1}$ . Измеряя модуль сигнала и его фазу в зависимости от расстояния между лучами, можно найти  $L_{eff}$  и  $L_\phi$ , которые однозначно определяют  $D$  и  $\tau$ . Особенно простым соотношения получаются в случае, когда  $\Omega^2 \ll 1$ :

$$D = 2\omega L_{eff}L_\phi, \tau = L_{eff}/(L_\phi 2\omega).$$

На низких частотах вклад «тепловой» компоненты является определяющим. Модуль измеряемого сигнала уменьшается с расстоянием с характерной длиной  $L_T$ . При этом коэффициент температуропроводности определяется как  $\kappa = 2\omega (L_T)^2$ .

**Эксперимент.** В экспериментальном исследовании возможности применения фоторефрактивного метода для одновременного измерения электронных и термических параметров кремниевых структур в одном технологическом цикле использовалась та же установка, что и в работах [6, 7]. Блок-схема экспериментальной установки показана на рис.2. В качестве источника луча накачки применялся YAG-лазер с длиной волны 1,06 мкм. Коэффициент поглощения такого излучения в кремнии составляет примерно  $10 \text{ см}^{-1}$ , что позволяет исследовать не только кремниевые пластины, но и слитки. Зондирование осуществлялось лучом He-Ne лазера с длиной волны 1,15 мкм. На этой длине кремний практически прозрачен. Диаметры зондирующего луча и луча накачки в



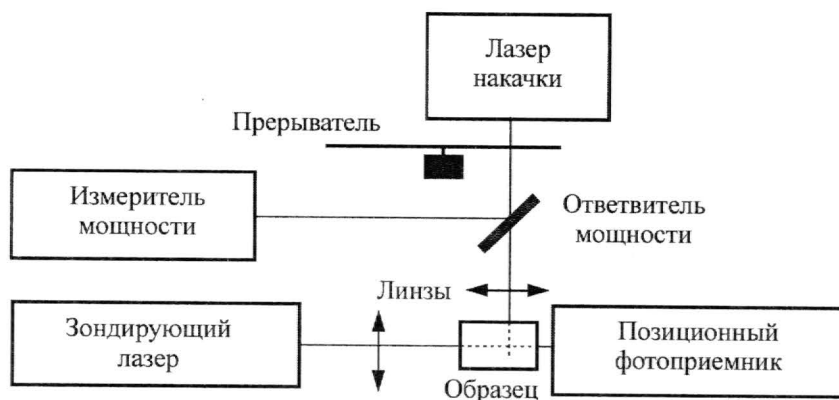


Рис.2. Блок-схема экспериментальной установки

зоне их взаимодействия составляли около 50 мкм. Изменение взаимного расположения лучей проводилось перемещением линзы, которая использовалась для фокусировки луча накачки. Механический прерыватель обеспечивал частоту модуляции луча накачки от 1 Гц до 2 кГц. Отклонение зондирующего луча регистрировалось позиционно-чувствительным приемником.

Основными источниками шумов в установке были: движение воздуха в комнате, рассеяние лучей на пылинках; дробовой шум фотоприемника, джонсоновский шум входного каскада усилителя; флуктуация интенсивности и положения зондирующего луча. Защита специальными коробами участков прохождения лучей и подбор сопротивления нагрузки фотоприемников позволили значительно снизить шумы, связанные с первыми двумя факторами. После этого основным фактором, ограничивающим чувствительность установки, стала флуктуация угла отклонения зондирующего излучения, которая в использованном лазере ЛГН-208 была примерно  $10^{-8}$  рад·Гц $^{-1/2}$ .

**Результаты и их обсуждение.** В качестве модельных были исследованы образцы *n*- и *p*-типа кремния с разными временами жизни. Термические параметры определялись на частоте модуляции излучения накачки 10 Гц, электронные – 1600 Гц. Для сравнения использовались результаты измерения времени жизни по спаду фотопроводимости [1] и табличные данные коэффициента температуропроводности  $\kappa$  [7]. В таблице представлены некоторые характерные значения измеренных параметров.

**Характерные значения величин,  
измеренных фоторефрактивным и стандартными методами**

$\rho$ , Ом·см	Вид про- водимости	Фоторефрактивный метод			Стандартный метод	Данные [7]
		$\tau$ , мс	$D$ , см $^2$ /с	$\kappa$ , см $^2$ /с	$\tau$ , мс	$\kappa$ , см $^2$ /с
20000	<i>n</i>	1050	18	0,89	900	0,85
1800	<i>p</i>	350	17,5	0,87	300	0,85
35	<i>n</i>	700	14	0,85	800	0,85
5	<i>p</i>	300	31	0,85	250	0,85

Видно хорошее количественное совпадение значений времени жизни и коэффициента температуропроводности измеренных фоторефрактивным и стандартными методами. Полученные в результате фоторефрактивных измерений значения коэффициента диффузии носителей близки к приведенным в [2] значениям диффузии дырок (12 см $^2$ /с), электронов (30 см $^2$ /с) и амбиполярной (18 см $^2$ /с) диффузии в кремнии. Согласно оценкам ошибка измерений электрофизических параметров составляет около 10%, коэффициента температуропроводности – менее 5%.

Из проведенного теоретического анализа и эксперимента видно, что фоторефрактивный метод может применяться в качестве основы для бесконтактного, комплексного картирования электронных и термических свойств кремниевых структур. Предложена новая методика частотного разделения электронных и термических факторов влияния на фоторефрактивный эффект. Этот подход дает возможность одновременного измерения подвижности и времени жизни носителей заряда, а также коэффициента температуропроводности в одном технологическом цикле в любом месте объема образца. Комплексное картирование электрофизических параметров кремниевых структур в одном технологическом цикле, по-видимому, может найти применения для трехмерной диагностики объемных параметров кремния и кремниевых структур, в случае если будет найдено технологическое решение по созданию объемных интегральных схем.

### Литература

1. Павлов Л.П. Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов. – М.: Высш. шк., 1975. – 206 с.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2 кн. Кн. 1: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
3. Book of Abstracts 17-th European Conf. on Thermophysical Properties (Bratislava 2005, Slovakia). – 2005. – 198 p.
4. Миргородский В.И., Орлова Г.А., Филатов А.Л. Дистанционное зондирование твердых тел фототермодеформационным методом // ЖТФ. – 1992. – Т. 3. – Вып. 63. – С. 180–185.
5. Filatov A.L., Sablicov V.A., Mirgorodsky V.I. Photorefractive method of contactless determination of the charge carrier lifetime and diffusion coefficient in semiconductors // Semicond. Scint. Techn. – 1993. – Vol. 8. – P. 694–699.
6. Филатов А.Л., Миргородский В.И., Сабликов В.А. Фоторефрактивный метод бесконтактного зондирования рекомбинационных параметров полупроводников // ФТП. – 1993. – Т. 27. – Вып. 1. – С. 81–85.
7. Филатов А.Л. Особенности применения фоторефрактивного метода для локального, бесконтактного определения коэффициента температуропроводности // ЖТФ. – 1998. – Т. 68, № 9. – С. 115–119.
8. Кикоин И.К. Таблицы физических величин: Справ. – М.: Атомиздат, 1976. – 1006 с.

Статья поступила  
17 октября 2007 г.

**Филатов Александр Леонидович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник института радиотехники и электроники РАН. *Область научных интересов:* фотоакустика полупроводников.

**Луговской Александр Владимирович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник института радиотехники и электроники РАН. *Область научных интересов:* фотоакустика, спиновые волны в магнетиках, дистанционное СВЧ-зондирование земной поверхности.

#### 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

# Применение инверсионной вольтамперометрии для контроля содержания микропримесей в синтетическом сапфире

*Т.И.Хаханина, А.А.Гурская*

Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)

Проанализированы современные методы контроля примесей в синтетическом сапфире. Предложен метод инверсионной вольтамперометрии, разработан алгоритм проведения анализа на примере цинка и меди. Особое внимание уделено чрезвычайно важной стадии – пробоподготовке. Приведены экспериментальные данные по выбору электрохимических параметров анализа.

Синтетический сапфир нашел широкое применение в оптике, оптоэлектронике, микроэлектронике, медицине и в других областях. В микроэлектронике особый интерес этот материал представляет в качестве подложек для гетероэпитаксии нитридов III группы из-за сходности типа и параметров кристаллических решеток, температурного коэффициента расширения и относительно невысокой стоимости.

К синтетическому сапфиру, используемому в качестве подложек, предъявляются жесткие требования по морфологии и химической чистоте, которая зависит от многих факторов: чистоты исходного сырья, оборудования для выращивания, метода выращивания и т.п., систематизировать которые не представляется возможным [1]. Вероятно поэтому, до настоящего момента не разработаны какие-либо стандарты качества – российские или международные. Качество продукции предприятия регулируют в соответствии со своими внутренними стандартами.

На сегодняшний день лучшие образцы синтетического сапфира имеют чистоту до 99,997%, концентрация примесей при этом не выше 40 ppm. В микро- и оптоэлектронике допустимо использование пластин с суммарным содержанием примесей до 100 ppm.

В готовой продукции контролируется содержание Na, Si, Fe, Ca, Ni, Pb, Ti, Cu, Zr, Cd, Y, Mg, Zn, K [2, 3]. Поэтому важнейшим условием производства высококачественных подложек является обеспеченность методами и средствами аналитического контроля на уровне микроконцентраций. Для этого используются спектрометрия в индукционной аргоновой плазме, масс-спектрометрия (искровая и лазерная), рентгенофлуоресцентный спектральный анализ (РФА). Данные методы обладают хорошим уровнем чувствительности, но оборудование отличается относительно высокой стоимостью. На производстве анализ осуществляется только на последней стадии, после всех технологических операций, что явно недостаточно.

В настоящей работе предлагается использовать в качестве метода контроля химического состава сапфира инверсионную вольтамперометрию (ИВ), которая имеет ряд преимуществ. Предел обнаружения цинка, меди, а также кадмия и свинца методом ИВ составляет 0,4 ppm, что не уступает или превосходит показатели применяемых на производстве методов. Возможно также проведение многоэлементного анализа. Стоимость приборов для ИВ в среднем на порядок ниже стоимости оборудования для других методов.

Разработанный алгоритм анализа методом ИВ представлен в виде блок-схемы (рис.1). По предлагаемой методике могут контролироваться все важные примеси в синтетическом сапфире. В данной работе рассматривается пример определения одних из наиболее опасных загрязнений – цинка и меди.

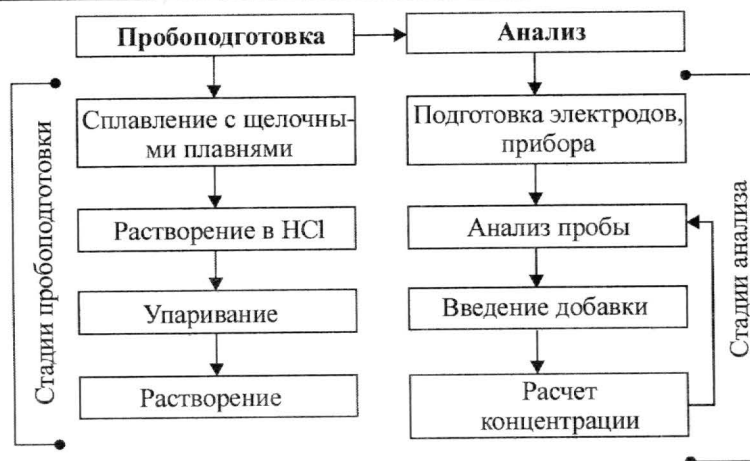


Рис. 1. Алгоритм анализа синтетического сапфира методом ИВ

Стадия предварительной химической подготовки проб – одна из наиболее трудных и ответственных стадий всего анализа в целом. Во многих случаях эта стадия сама вносит вклад в контрольный опыт и лимитирует эффективность использования инструментальных методов анализа. Сначала проба приводится в состояние, обеспечивающее количественное определение соответствующих компонентов (в данном случае в раствор). Получить раствор анализируемой пробы твердого вещества можно, разложив ее «мокрым» (разложение растворами кислот, солей и щелочей) и «сухим» (разложение при помощи сплавления или спекания с различными плавнями) способами, а также путем использования некоторых специальных методов. Каких-либо общих правил в отношении выбора способа разложения не существует, так как в каждом конкретном случае способ вскрытия определяется рядом соображений, главнейшим из которых является полнота вскрытия анализируемого образца.

В рассматриваемом случае предметом анализа является оксид алюминия (синтетический сапфир). Оксид алюминия – амфотерный оксид, следовательно, можно предположить наличие реакционной способности как с кислотами, так и с щелочами. Однако здесь имеем дело с  $\alpha$ -модификацией, которая чрезвычайно устойчива к химическим воздействиям.

Были проведены эксперименты по выбору оптимального способа пробоподготовки с использованием различных тиглей, режимов, плавней. В данном случае единственным подходящим вариантом является сплавление (табл.1).

Таблица 1

## Способы пробоподготовки синтетического сапфира

Плавень	Материал тигля	Условия сплавления		Обработка плава	Примечание
		Температура, °C	Время		
Гидроксид натрия или калия в 15-кратном избытке (по массе)	Серебро, никель, железо	450	10 мин	Растворение концентрированной соляной кислотой, упаривание до сухих солей, растворение в воде	1. Материал тигля дает примесь 2. Происходит коррозия тигля 3. Максимальная степень чистоты гидроксидов – хч, что недостаточно
Карбонат натрия в 8-кратном избытке (по массе)	Железо, никель, платина	1100	20 мин	То же	1. Железо и никель дают примеси 2. Платина незначительно корродирует 3. Высокая температура сплавления

Плавень	Материал тигля	Условия сплавления		Обработка плава	Примечание
		Температура, °С	Время		
Смесь безводного карбоната натрия и калия в соотношении 1:1 в 8-кратном избытке (по массе)	То же	850	15 мин	То же	Железо и никель дают примеси
Смесь безводных карбоната и тетрабората натрия в соотношении от 1:4 до 3:1 в 40-кратном избытке (по массе)	Платина, кварц, фарфор	1100	2–10 мин	—"	1. Большой избыток плавня 2. Высокая температура сплавления
Тетраборат натрия в 14-кратном избытке (по массе)	Платина, фарфор, кварц, серебро, графит	1000–1200	20 мин	Растворение в разбавленной соляной кислоте, удаление борной кислоты нагреванием с метанолом	1. Высокая температура сплавления 2. Тигли, кроме платины, могут давать примеси 3. Метанол – яд
Пиросульфат калия или натрия в 20-кратном избытке (по массе)	Платина, плавильный кварц, фарфор	500–600	15 мин	Растворение в разбавленной серной или соляной кислоте, но не в воде, упаривание, добавление воды	1. Чистота плавня недостаточная 2. Коррозия тигля
Карбонат натрия и оксид магния 1:2 в 8-кратном избытке (по массе)	Платина, кварц, фарфор	800–850	1,5–2 ч	Выщелачивание разбавленной серной кислотой	Длительность сплавления
Карбонат натрия в 10-кратном избытке (по массе)	Никель, железо, корунд, цирконий	600–700	15–20 мин	Обработка плава водой с кипячением	1. Недостаточная чистота плавня 2. Незначительная коррозия тигля

При сплавлении возникают следующие проблемы:

- в большинстве случаев происходит коррозия в большей или меньшей степени, что приводит к разрушению самого тигля и внесению примесей в сплав;
- большинство веществ, использовавшихся для вскрытия пробы, чрезвычайно химически активны и даже при хранении адсорбируют примеси из окружающей среды, которые затем попадают в плав;
- наиболее распространенные в лабораторной практике муфельные печи дают температуру не выше 950 °С, при необходимости использовать более высокую температуру стоимость печи может значительно увеличиться;
- некоторые из рассмотренных способов требуют длительного времени сплавления (до 2 ч), что нежелательно при анализе материалов на производстве.

На основании полученных данных и условий, которым должна отвечать методика, выбрано сплавление со смесью безводного карбоната натрия и калия в соотношении 1:1,



взятых в 8-кратном избытке по массе (материал тигля – платина, температура сплавления 850 °С в течение 15 мин) с последующим растворением в соляной кислоте, упариванием до сухих солей и растворением в воде. После проведения этих операций получали раствор хлоридов металлов, входящих в состав образца.

Анализ проводился на вольтамперометрическом комплексе СТА (Россия). Выбор рабочего электрода для электроконцентрирования ионов металла зависит от природы элемента, т.е. области потенциалов и его восстановления и окисления. Известно, что для обратимого (т.е. лимитируемого диффузией) процесса потенциал анодного пика связан с потенциалом полуволны соотношением [4]:

$$E_a = E_{1/2} + \frac{0,029}{z} [V]. \quad (1)$$

В свою очередь, потенциал полуволны практически равен стандартному потенциалу металла:

$$E_{1/2} \approx E^0 + 0,01 [V]. \quad (2)$$

Рассчитанные по формулам (1), (2) потенциалы анодного пика элементов составили: для цинка –0,900 В, для меди –0,050 В. Рабочая область ртутно-пленочного электрода находится в диапазоне от +0,4 до –1,6 В, кроме того, исследуемые элементы образуют амальгамы с его поверхностью, поэтому этот электрод был выбран в качестве рабочего. Вспомогательный электрод и электрод сравнения (стандартный для электрохимических методов анализа) – хлорид-серебряные.

Полярографическим фоном служила бидистиллированная вода с добавлением муравьиной кислоты для обеспечения электропроводности и устранения мешающего фактора – растворенного кислорода.

Потенциал электролиза  $E_3$  должен быть таким, чтобы выделение определенного металла происходило максимально полно. Практически  $E_3$  находится на 0,2–0,3 В отрицательнее потенциала полуволны на ртутно-пленочном электроде. Однако удобнее получить зависимость анодного тока от потенциала электролиза  $I(E_3)$  и выбрать область предельного тока (рис.2).

Поскольку цинк обладает меньшей электроотрицательностью, чем медь, то при потенциале электролиза цинка произойдет и электронакопление меди. Поэтому был выбран потенциал электролиза –1,2 В.

Выбор времени электролиза  $t_3$  зависит от концентрации металла в растворе: чем она меньше, тем больше времени электролиза необходимо для получения хорошо измеряемого сигнала. Зависимость  $I(t_3)$  легко получить из опыта. Были сняты зависимости анодного тока от времени электролиза для цинка (рис.3) и меди (зависимость аналогична) при концентрации элементов 0,0002 моль/дм<sup>3</sup>.

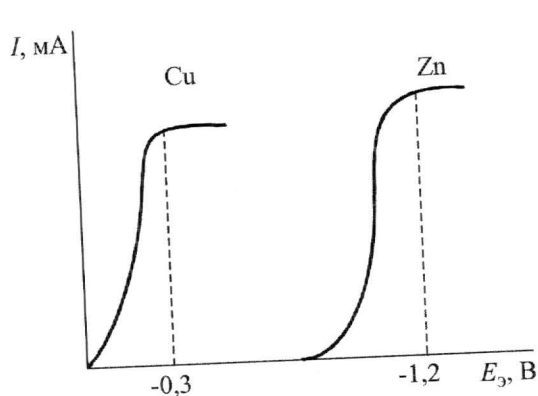


Рис.2. Зависимость анодного тока от потенциала электролиза цинка

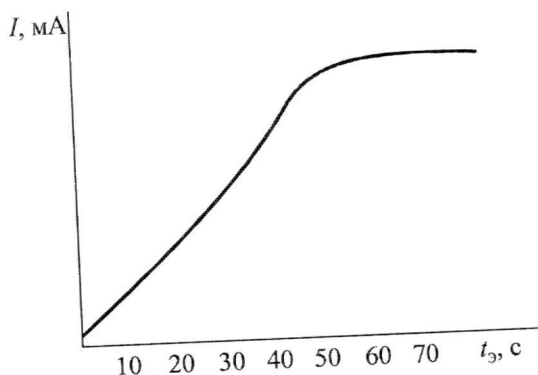


Рис.3. Зависимость анодного тока от времени электролиза

На основе полученной зависимости выбрано время электролиза 60 с.

При планировании эксперимента по оценке характеристик погрешности результатов измерений сделаны следующие предпосылки:

- погрешность результатов измерений представляет собой суперпозицию случайной и систематической составляющих;
- случайная составляющая погрешности результата подчиняется нормальному закону распределения.

Правильность предлагаемой методики проверялась методом «введено–найдено» (табл.2) и сравнением со стандартным используемым методом РФА.

С помощью данной методики и РФА проанализированы шихта и пластины из одной партии (табл.3) при следующих условиях: анализатор рентгенофлуоресцентный спектральный VRA-30 (Германия), молибденовая трубка в режиме 50 кВ, 30 мА. Анализ проводился в аналитической лаборатории ИНЭОС РАН им. Н.А. Несмеянова.

Таблица 2

Результаты проверки методики методом «введено–найдено»

Элемент	Содержание примеси, ppm	
	введено	найдено
Цинк	6	6,2±1,2
	10	10,7±1
	30	31±2
Медь	6	5,7±1
	10	9,3±1,2
	30	29±2,3

Таблица 3

Результаты анализа синтетического сапфира

Метод	Образец	Содержание примеси, ppm	
		Цинк	Медь
ИВ	Шихта	2	4
	Пластина	8	12
РФА	Шихта	< 3	< 3
	Пластина	7	13

В шихте и пластинах обнаружены цинк и медь. Причем их концентрация в шихте меньше, чем в пластинах. Это подтверждает предположение, что в ходе производства концентрация примесей может возрастать. Тем не менее, в исследованных образцах содержание цинка и меди находилось в пределах нормы. Данные, полученные методом ИВ, хорошо согласуются с результатами РФА.

Таким образом, установлено, что метод ИВ пригоден для анализа примесей в синтетическом сапфире, кроме того, он относительно дешев и прост. Разработанная методика направлена на аттестацию в органы Госстандарта.

Литература

1. Liu L., Edgar J.H. Substrates for gallium nitride epitaxy // Materials Science and Engineering R 37. – 2002. – P. 61–127.
2. Steven W. Novak, Charles W. Magee, Tom Moses, Wuyi Wang. Using SIMS to diagnose color changes in heat treated gem sapphires // Appl. Surface Science. – 2004. – Т. 231–232. – P. 917–920.
3. Ganguly P., Warren J. Poole In situ measurement of reinforcement stress in an aluminum- alumina metal matrix composite under compressive loading // Mat. Science and Engineering A352. – 2003. – P. 46–54.
4. Будников В.К., Майстренко В.Н., Вяселев М.Р. Основы современного электрохимического анализа. – М.: Мир. Бином. Лаборатория знаний, 2003. – 592 с.

Статья поступила  
20 июня 2007 г.

**Хаханина Татьяна Ивановна** – доктор технических наук, заведующая кафедрой общей химии и экологии МИЭТ. Область научных интересов: высокочистые вещества и современные аналитические методы их контроля, технология электронной техники.

**Гурская Анастасия Александровна** – аспирант кафедры общей химии и экологии МИЭТ. Область научных интересов: приборы и методы контроля.

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 658.562.012.7

### Функционально-итерационное проектирование СМК, соответствующей ГОСТ Р ИСО 9001:2001

*Д.Н.Гулидов, Е.В.Бородин, К.А.Селезнев*

Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)

*В.Н.Ивченко*

ЗАО «Нанотехнология-МДТ» (г. Москва)

В разработке соответствующих требованиям ГОСТ Р ИСО 9001:2001 систем менеджмента качества (СМК) используется классический так называемый каскадный способ монолитного проектирования, при котором все функции системы реализуются в самом конце разработки и ее обнаруживаемые недостатки устранить либо сложно, либо вообще невозможно. Трудности предвидения актуальности отдаленных результатов проектов, непрозрачность их выполнения, а также отдаленность возврата инвестиций объективно востребовали развитие нового итерационного метода проектирования. Устраняя недостатки, этот метод обеспечил способность учета изменений самих требований, а следовательно, и профиля разработки.

В основе новой модели реализации проекта – «расслоение» проектируемой системы по «квантам» – итерациям законченных функциональностей. Если провести перекрестное назначение составляющим деревьев функциональной и физической конфигурации, то каждая итерация приращения функциональности системы планируется как работающая часть реализации конечной системы, которая строится на результатах предыдущих этапов, развивая и совершенствуя систему до тех пор, пока не будет создан конечный продукт.

Проект, представляемый как своеобразная совокупность мини-проектов с итеративным воспроизведением подобных процессов оказался плодотворным в тех областях предметной деятельности, в которых проектируемая система может быть функционально «расслоена» (стратифицирована). Например, в предметной области разработки ПО преимущества итеративного подхода перед каскадным выявились по обеспечению следующих возможностей:

- разработки на первых итерациях функциональности с наибольшей степенью риска, чтобы быстрее и экономичнее обнаружить ожидаемые дефекты или неожиданные несоответствия;
- тактического изменения в продукте для его быстрого выпуска с некоторыми ограничениями, чтобы ответить на действия конкурента;
- обнаружения дефектов на ранних итерациях, а не в ходе массированного тестирования в конце проекта, когда узкие места в производительности системы обнаруживаются перед самым выпуском продукта;
- расширения свойств системы из-за адаптации его к изменяющимся требованиям, что не приводит к опозданию с выпуском и нарушению графиков;
- итеративности интеграции частей системы по этапам, а не как «один большой взрыв» в конце проекта, когда интеграция означает возникновение переработок с большими затратами времени (до 40% всего объема проекта);
- многократного переиспользования (reuse) полученных ранее результатов в последующих проектах, что способствует росту ИР-рынка (интеллектуальной собственности) и становлению его одним из решающих факторов ускорения разработок и даже критерием выбора изготовителя системы.

Выгоды итерационно-модульной организации деятельности проявились в расширении сферы применения функционально-итерационного проектирования (ФИП) с разработок продуктов на их производство, а затем и на процедуры его управления. Результатом этой эволюции явилась разработка институтом SEI (Software Engineering Institute, США) нормативной среды функциональностей систем менеджмента качества программных фирм по пяти так называемым уровням зрелости CMM (Capability Maturity Model) [1].

Каждый уровень зрелости формирует отдельный слой функционального совершенствования СМК – от выбора целей процесса, обоснования критериев их достижения до внедрения этих различных составляющих функциональностей. Такая четкая функциональная стратификация уже не самих разработок ПО, а организации процессов управления ими является решающим аргументом применимости ФИП к разработке ИСО-совместимых СМК. Его преимущества будучи спроецированы на прикладную область проектирования СМК, могли бы обеспечить значительное повышение эффективности отечественных разработок, устранить увеличивающийся разрыв в нормативном сопровождении конкурентоспособности отечественных производств в преддверии вступления России в ВТО.

В этих целях совокупность требований ГОСТ Р ИСО 9001:2001 была представлена как функциональный интерфейс, стратификацию которого можно отобразить в терминах следующего набора объявляемых функциональностей.

1. *Функциональность матричной организации управления*, которая исходное иерархически вертикальное управление существенно оптимизирует наложением на нее горизонтальных связей управления по процессам. Такой переход от вертикальной («дивизионной») организации управления к матричной достигается по п. 5.5 ГОСТ Р ИСО 9001 посредством разработки и внедрения в организации документов, дополняющих иерархию должностных отношений сотрудников их отношениями в ролях внутренних поставщиков, потребителей, владельцев и исполнителей процессов. Этим делегируются полномочия и ответственность за результативность деятельности на уровень компетенции владельцев и исполнителей процессов.

2. *Функциональность консенсусного нормативного менеджмента*, которая осуществляет переход управления предприятия организации от менеджмента распорядительного типа к нормативному, основанному на разработке, согласовании и введении в организации норм взаимоприемлемых для всех, кто оказывается в их сфере действия. Таким образом, в организации происходит разделение ответственности за уровень принимаемых норм, поскольку разрабатываются документы по процедуре, которая обязывает разработчика стандарта найти баланс мнений, учитывая мотивацию и возможности всех заинтересованных в его выполнении сторон.

3. *Функциональность двухконтурного управления процессами* по PDCA-циклу управления по несоответствиям относительно установленных требований и PDCA-цикла управления самими требованиями на процесс.

4. *Функциональность учета и контроля результативности деятельности* посредством представления процессов в терминах генерируемых ими данных. На основе современных средств информационного моделирования в среде Express G и IDEF/x построена концептуальная модель БД, которая предоставляет владельцам процессов метод организации контейнера регистрации данных СМК и доступ к нему, освобождая от написания множества документов, но обеспечивая доказательность выполнения требований ГОСТ Р ИСО 9001 [2].

Преимуществом предлагаемого метода проектирования СМК является адаптивность разработки по очередности внедряемых функций. Например, если первыми «квантами функциональности» являются актуальные для организации документы проектного управления, то в последующем те же документы используются уже для разработки самой СМК, но по плану, приведенного выше профиля ФИП.

Функциональная законченность итераций при таком способе проектирования СМК позволяет существенно ускорить возврат инвестиций на ее разработку, снизить риски ее неэффективного освоения при одномоментном – в конце традиционного проекта – внедрении десятков стандартов организации, а также требуемых ими форм и записей.

**Литература**

1. Модель зрелости процессов разработки программного обеспечения / *М. Паулк, Б. Куртис, М. Хриссис и др.* – М.: Интерфейс-пресс, 2002. – 256 с.
2. ГОСТ Р ИСО 9001:2001. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 20 С.

Поступило 5 октября 2007 г.

**Гулидов Дмитрий Николаевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой системной среды качества (ССК) МИЭТ. *Область научных интересов:* системный анализ, CALS(ИПИ)-технологии, разработка систем качества, проектное управление.

**Бородин Евгений Владимирович** – аспирант кафедры ССК МИЭТ. *Область научных интересов:* корпоративные информационные системы.

**Селезнев Константин Андреевич** – аспирант кафедры ССК МИЭТ. *Область научных интересов:* корпоративные информационные системы, IDEF-моделирование процессов.

**Ивченко Владимир Николаевич** – менеджер службы обеспечения качества и сертификации ЗАО «Нанотехнология-МДТ» (г. Москва). *Область научных интересов:* разработка систем качества, проектное управление.



УДК 621.372.56

## Расчет Т-образных поглощающих элементов чип-аттенюаторов для поверхностного монтажа

В.Н.Уткин

ОАО «НПО ЭРКОН» (г. Нижний Новгород)

В.Д.Садков, Д.Ю.Якимов

Институт радиоэлектроники и информационных технологий Нижегородского государственного технического университета

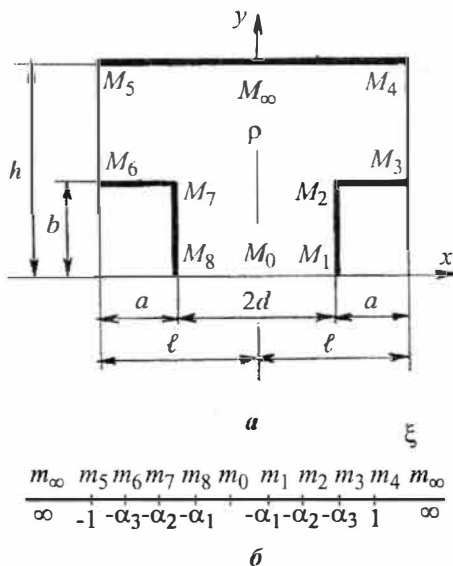


Рис.1. Топология Т-образного поглощающего элемента чип-аттенюатора в плоскости  $z$  (а) и ее отображение на верхнюю полуплоскость  $\xi$  (б)

Широкополосные аттенюаторы с пленочными поглощающими элементами (ПЭ) широко используются в телевизионных, радиоприемных и измерительных системах для измерения и калиброванного ослабления мощности радиосигналов, взаимной развязки трактов и уменьшения вносимых ими отражений [1]. ПЭ таких аттенюаторов могут быть построены на основе как сосредоточенных (по П- и Т-схемам), так и распределенных резистивных структур. Последние отличаются нечувствительностью к точечным дефектам и неоднородностям, разбросу технологических параметров, точностью и широкополосностью, большей устойчивостью к импульсным и температурным воздействиям и в наибольшей степени отвечают растущим требованиям рынка на прецизионные пассивные компоненты [2, 3].

Известные топологии ПЭ на основе распределенных резистивных структур, разработанные ранее для коаксиальных и полосковых трактов, оказываются непригодными для построения чип-аттенюаторов для поверхностного монтажа. Контакты таких чип-аттенюаторов по технологическим соображениям должны располагаться на противоположных сторонах подложки и охватывать ее.

Предлагается топология, обеспечивающая в рамках заданных габаритов реализацию широкого диапазона ослаблений (1–80 дБ) при достаточно равномерном распределении тока между контактами. Отображение многоугольника  $M_0M_1M_2M_3M_4M_5M_6M_7M_8$  в плоскости  $z$  (рис.1,а) на верхнюю полуплоскость  $\xi$  (рис.1,б) с указанным соответствием точек проводится с помощью интеграла Кристоффеля–Шварца [4]:

$$z = A \int_0^{\xi} \sqrt{(\xi^2 - a_2^2)/(\xi^2 - a_1^2)(\xi^2 - a_3^2)(\xi^2 - 1)} d\xi.$$

Константы  $a_i$  определяются из системы уравнений:

$$d/\ell = I_1/I_5, \quad b/\ell = I_2/I_5, \quad a/\ell = I_3/I_5, \quad (h-b)/\ell = I_4/I_5, \quad (1)$$

где гиперэллиптические интегралы

$$\begin{aligned} I_1 &= A \int_0^{a_1} \sqrt{(a_2^2 - \xi^2)/(\xi^2 - a_1^2)(a_3^2 - \xi^2)(1 - \xi^2)} d\xi; \quad I_2 = A \int_{a_1}^{a_2} \sqrt{(a_2^2 - \xi^2)/(\xi^2 - a_1^2)(a_3^2 - \xi^2)(1 - \xi^2)} d\xi; \\ I_3 &= A \int_{a_2}^{a_3} \sqrt{(\xi^2 - a_2^2)/(\xi^2 - a_1^2)(a_3^2 - \xi^2)(1 - \xi^2)} d\xi; \quad I_4 = A \int_{a_3}^1 \sqrt{(\xi^2 - a_2^2)/(\xi^2 - a_1^2)(\xi^2 - a_3^2)(1 - \xi^2)} d\xi; \\ I_5 &= A \int_1^{\infty} \sqrt{(\xi^2 - a_2^2)/(\xi^2 - a_1^2)(\xi^2 - a_3^2)(\xi^2 - 1)} d\xi \end{aligned}$$

вычисляются с использованием квадратурных формул наивысшей алгебраической степени точности после приведения их интервалов интегрирования к стандартному  $(-1, 1)$  и выделения особенностей в весовую функцию [5]. В Mathcadе система (1) легко решается с использованием режима символьных вычислений.

Сопротивления П-образной схемы замещения  $R_{13}$  и  $R_{12} = R_{23}$  между контактами 1 и 3, 1 и 2, а также входное сопротивление  $R_{вх}$  и ослабление  $q$  (дБ) согласованного ПЭ (см.рис.1,а) определяются соотношениями [4]:

$$\begin{aligned} R_{13} &= 2\rho/[K'(m)/K(m) - K(m_1)/K'(m_1)], \quad R_{12} = \rho K'(m_1)/K(m_1), \\ m^2 &= (a_1/a_3)^2 (1 - a_3^2)/(1 - a_1^2), \quad m_1^2 = (a_3^2 - a_1^2)/(1 - a_1^2), \\ R_{вх} &= R_{12}/[1 + 2/(R_{13}/R_{12})]^{1/2}, \quad q = 20\lg\{1 + R_{13}/R_{12} + [(R_{13}/R_{12})^2 + 2(R_{13}/R_{12})]^{1/2}\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь и далее использованы обозначения, принятые в теории полных эллиптических интегралов и эллиптических функций Якоби [4].

По заданным  $R_{вх}$  и  $q$  определяются  $R_{13}$  и  $R_{12}$ ,  $m$  и  $m_1$ , константы  $a_1$  и  $a_3$ :

$$a_1 = mm_1/[(1 - m^2)(1 - m_1^2)]^{1/2}, \quad a_3 = m_1/(1 - m^2)^{1/2}. \quad (3)$$

При найденных по (3) константах  $a_1$  и  $a_3$  изменение неизвестной константы  $a_2$  в интервале  $a_1 < a_2 < a_3$  позволяет по (1) определить все множество топологий ПЭ с заданными  $R_{13}$  и  $R_{12}$  или  $R_{вх}$  и  $q$ . Этот результат невозможно получить никаким другим методом.

В частном случае при  $b = 0$  соотношения (2) принимают вид:

$$\begin{aligned} R_{вх} &= \rho\{K'(p_1)/K(p)/[K(p_1)/K'(p)]\}^{1/2}, \\ q &= 20\lg\{1 + 2/(A - 1)\}, \quad A = [K'(p_1)/K'(p)/(K(p_1)/K(p))]^{1/2}, \\ p_1 &= ksn(Kd/\ell, k), \quad p = cn(Kd/\ell, k). \end{aligned} \quad (4)$$

В формулах (4) величины  $K$  и  $k$  находятся из соотношения  $K'/K = h/\ell$  или через быстросходящиеся функции тэта-нулевого аргумента [4]:

$$k = [v_2(0, q)/v_3(0, g)]^2, \quad K = (\pi/2)v_3^2(0, g), \quad g = \exp(-\pi h/\ell).$$

В частном случае при  $b = a$  и  $\ell = h$  получаем:

$$R_{\text{вх}} = (\rho/2^{1/2}) \{K(r)/K'(r_1)/[K'(r)/K(r_1)]\}^{1/2}, \quad r = [(1-\alpha)/(1+\alpha)/2]^{1/2}, \quad r_1 = \alpha,$$

$$q = 20 \lg \{1 + 2^{3/2}/(A-1)\}, \quad A = [K'(r_1)K'(r)/(K(r_1)K(r))]^{1/2}.$$

Параметр  $\alpha$  находится из соотношения [6]:

$$a/\ell = \alpha^{1/2} B(1/2, 3/4) F(1/2, 3/4; 5/4; \alpha^2) / B(1/2, 1/4) F(1/2, 1/4; 5/4; \alpha^2),$$

где  $F(\cdot)$  и  $B(\cdot)$  – гипергеометрическая и бета-функция соответственно.

Зависимость ослабления и нормированного входного сопротивления аттенюатора от  $2d$  при  $h = 1,7$  мм,  $b = 0,65$  мм и разных значениях  $2\ell$  приведена на рис.2.

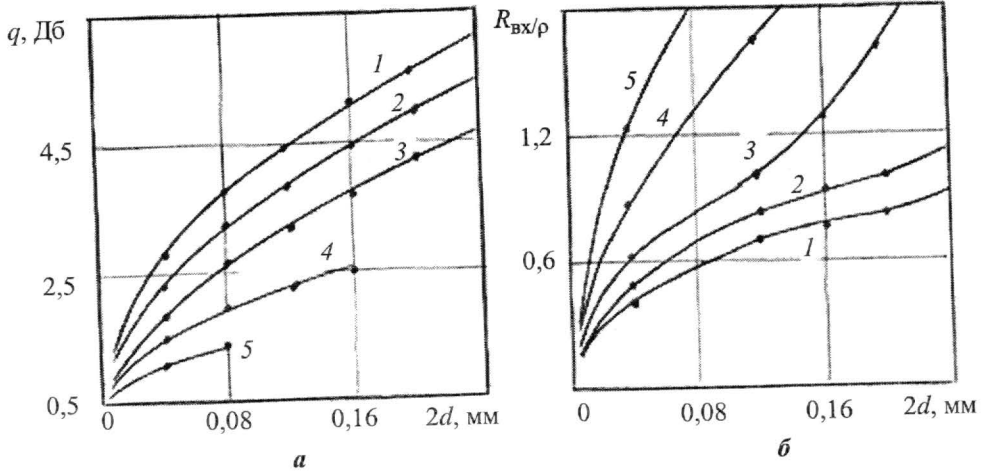


Рис.2. Зависимость ослабления (а) и нормированного входного сопротивления (б) поглощающего элемента (точки – эксперимент) от  $2d$  при  $h = 1,7$  мм,  $b = 0,65$  мм и  $2\ell = 0,64$  мм (1);  $0,48$  мм (2);  $0,32$  мм (3);  $0,16$  мм (4);  $0,08$  мм (5)

Полученное множество топологий может быть использовано для выбора оптимальной по частотным свойствам топологии с помощью программ электродинамического моделирования.

### Литература

1. Садков В.Д., Прядилов С.А. Синтез тонкопленочных резистивных элементов затухания сложной геометрической формы // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 1999. – № 2. – С. 76–80.
2. Проспект фирмы Nanowave Technologies Inc. Miniature Hybrid microwave integrated circuits, 2006.
3. Проспект фирмы Aeroflex. Microwave terminator, resistor, attenuator, 2006.
4. Широков Л.В., Ямпури Н.П., Садков В.Д. Теория аналитических функций. Аспекты приложений. – Арзамас: АГПИ, 2004. – 188 с.
5. Крылов В.В. Приближенное вычисление интегралов. – М.: Наука, 1967. – 500 с.
6. Садков В.Д., Орлов Д.Е. Расчет резисторов с центральной контактной площадкой // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 1992. – № 12. – С. 57–59.

Поступило  
15 октября 2007 г.

**Уткин Валерий Николаевич** – начальник отдела ОАО «НПО ЭРКОН». Область научных интересов: проектирование и производство пленочных структур ВЧ- и СВЧ-диапазона.

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

**Якимов Дмитрий Юрьевич** – студент Института радиоэлектроники и информационных технологий Нижегородского государственного технического университета. Область научных интересов: разработка программ моделирования пленочных структур ВЧ- и СВЧ-диапазона.



# ЮБИЛЕИ

Копаеву Юрию Васильевичу – 70 лет



21 октября 2007 г. исполнилось 70 лет члену-корреспонденту РАН, директору Отделения физики твердого тела Физического института им. П.Н.Лебедева РАН, доктору физико-математических наук, профессору Юрию Васильевичу Копаеву.

После окончания в 1964 г. аспирантуры Московского энергетического института и защиты кандидатской диссертации (руководитель – Л.В.Келдыш) он работал в Зеленограде в НИИ молекулярной электроники. В 1972 г. Ю.В.Копаев перешел в отдел теоретической физики ФИАНа, в 1975 г. защитил докторскую диссертацию. В 1992 г. Ю.В.Копаев стал руководителем лаборатории физики полупроводников ОФТТ ФИАН, а с 1993 г. – директором Отделения.

Ю.В.Копаев – ученый в области теории равновесных и неравновесных фазовых переходов, теории высокотемпературной сверхпроводимости, лазеров, полупроводниковых квантовых приборов.

В 1964 г. опубликована известная работа по теории диэлектрических фазовых переходов (модель Келдыша–Копаева), в которой было показано, что модифицированный формализм БКШ теории сверхпроводимости может быть эффективно использован для описания фазовых переходов металл–диэлектрик в твердых телах. Впоследствии диэлектрическая фаза в модели Келдыша–Копаева получила название «экситонного диэлектрика», ставшее общепотребительным.

В составе коллектива, представившего работу «Предсказание, обнаружение и исследование бесщелевых полупроводников и экситонных фаз», Ю.В.Копаеву в 1982 г. присуждена Государственная премия СССР.

Ю.В.Копаевым с соавторами был предложен и подробно исследован электронный механизм лазерного отжига. Разрушение кристаллической структуры связано с возникновением структурной

неустойчивости при возбуждении неравновесных носителей заряда (неравновесный фазовый переход) и наблюдается в ряде полупроводников. Эти работы в составе цикла «Открытие явления импульсной ориентированной кристаллизации твердых тел (лазерный отжиг)» отмечены Государственной премией СССР 1988 г. (в коллективе).

В области развития физических основ наноэлектроники Ю.В.Копаевым с соавторами разработаны новые принципы обработки и преобразования информации, основанные на управляемой перестройке когерентных состояний квантовых гетероструктур, содержащих туннельно-связанные квантовые ямы, и предложены новые типы функционально-интегрированных логических квантовых элементов. Им разработана микроскопическая кинетическая теория квантового каскадного лазера и предложены варианты конструкции, обеспечивающие снижение критических токов и повышение рабочей температуры.

С 1975 г. профессор Ю.В.Копаев преподает в Московском государственном институте электронной техники. Им прочитаны курсы «Физика твердого тела», «Физика полупроводников», «Физическая природа биологических полей», «Неупорядоченные полупроводники», «Кинетические процессы в полупроводниках», «Физические основы наноэлектроники». Всегда содержательные и нетривиальные лекции Ю.В.Копаева стали событием для многих студентов, которых они привели в науку. Под его руководством защитились 14 кандидатов наук, 4 доктора наук. Копаев Ю.В. – автор более 200 научных трудов, в том числе монографий, изданных за рубежом.

По инициативе Ю.В.Копаева, в 1994 г. был организован Научно-образовательный

центр ФИАН и МИЭТ «Квантовые приборы и нанотехнологии», в котором он является председателем совета директоров. НОЦ объединил научный потенциал Отделения физики твердого тела ФИАН в области физики твердого тела и полупроводников и опыт ученых МИЭТ в области разработки и проектирования полупроводниковых приборов и интегральных схем на их основе для разработки и создания квантовых приборов, работающих на новых физических принципах, и совместной подготовки специалистов по этим направлениям. В НОЦ выполнен ряд важных научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок в области наноэлектроники. Разработаны и созданы первые в России квантово-классические интегральные микросхемы. В 2005 г. Ю.В.Копаеву присуждена премия Президента Российской Федерации в области образования.

Копаев Ю.В. – заместитель главного редактора журнала «Журнал экспериментальной и теоретической физики», член редколлегии журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника», член Ученого совета Физического института им. П.Н.Лебедева РАН, председатель специализированного кандидатского совета Физического института им. П.Н.Лебедева РАН, член Специализированных Ученых советов ФИАН, ИО-ФАНа и МИЭТ, председатель секции «Теория конденсированного состояния» Научного совета Президиума РАН «Физика конденсированного состояния».

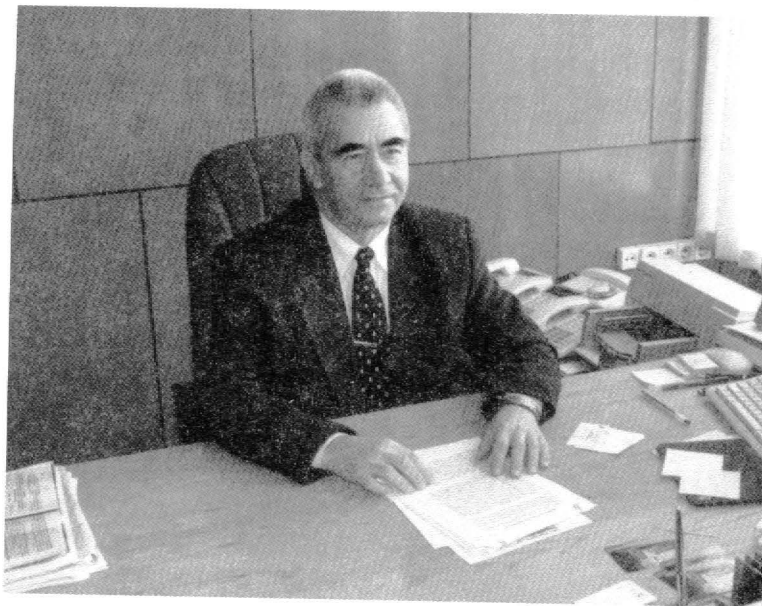
За многолетний труд и научные заслуги Ю.В.Копаев награжден орденом «Знак почета».

*Поздравляем Юрия Васильевича со знаменательной датой, желаем крепкого здоровья и дальнейших творческих свершений.*

*Редколлегия*



## Бархоткину Вячеславу Александровичу – 70 лет



25 января 2008 г. исполнилось 70 лет Бархоткину Вячеславу Александровичу, доктору технических наук, профессору, заслуженному деятелю науки Российской Федерации, лауреату Государственной премии СССР в области науки и техники, члену-корреспонденту Российской академии ракетно-артиллерийских наук, лауреату премии Президента России в области образования, дважды лауреату премии им. С.И.Мосина.

Вячеслав Александрович – известный ученый, конструктор и педагог в области проектирования специализированных вычислительных средств для систем управления и обработки информации. Им разработаны оригинальные методы анализа и синтеза вычислительных устройств для замкнутых нелинейных аналоговых и дискретных систем управления, обеспечивающих заданные тактико-технические характеристики, предложен инженерный метод исследования влияния вычислительных средств с нелинейной

обработкой информации на частотные характеристики замкнутых систем автоматического управления, разработан метод повышения точности систем наведения. Приоритет решения ряда вопросов в области систем управления различного назначения защищен авторскими свидетельствами.

В 1962 г. Бархоткин В.А. закончил с отличием МВТУ им. Н.Э.Баумана и последующие 10 лет работал на кафедре «Счетно-решающие устройства» МВТУ (факультет «Приборостроение») в должностях инженера, старшего инженера, ассистента, доцента. В 1972 г. переведен в МИЭТ на должность доцента кафедры «Вычислительная техника». В том же году назначен начальником, в 1975 г. – начальником и заместителем Главного конструктора, в 1988 г. – начальником и Главным конструктором Отраслевой лаборатории Минобороны СССР в МИЭТ. После реорганизации Лаборатории назначен на должность директора и Главного

го конструктора НИИ вычислительных средств и систем управления МИЭТ.

Работу в Отраслевой лаборатории и НИИ Бархоткин В.А. совмещал и продолжает совмещать с активной учебно-педагогической деятельностью: в 1981 г. избран профессором, в 1988 г. возглавил кафедру «Вычислительная техника» МИЭТ. В 1998 г. Бархоткин В.А. назначен проректором МИЭТ по научной работе.

Профессор Бархоткин В.А. – руководитель работ по созданию специализированных управляющих и вычислительных систем на основе современной элементной базы микроэлектроники. Возглавляет большой коллектив ученых, конструкторов и инженерно-технических работников, выполняющих полный цикл разработки вычислительных устройств в интересах укрепления обороноспособности страны. При его непосредственном участии созданы, испытаны и внедрены системы управления противотанковыми управляемыми снарядами, оригинальные конструкции танковых баллистических вычислителей, вычислительные системы зенитных, корабельных и артиллерийских комплексов, поставленных на вооружение как в российской армии, так и в армиях ряда зарубежных стран.

Известны разработки профессора Бархоткина В.А., используемые в промышленности, энергетике, на транспорте, в социальной сфере.

Профессор Бархоткин В.А. – руководитель научной школы в МИЭТ в области проектирования информационно-управляющих систем специального назначения, которая стала победителем конкурсов на соискание грантов Президента России по государственной поддержке ведущих творческих коллективов.

Бархоткин В.А. внес значительный вклад в становление и развитие современных форм организации учебного процесса.

Им разработаны и поставлены курсы лекций по следующим дисциплинам: «Элементы и системы автоматического регулирования», «Основы автоматики», «Теория автоматического регулирования», «Основы автоматики вычислительных устройств», «Вычислительная техника в инженерных и экономических расчетах», «Основы теории приборов управления», «Основы измерений», «Основы автоматического регулирования приборов управления», «Специализированные вычислительные устройства» и др.

Профессор Бархоткин В.А. подготовил 5 докторов и более 20 кандидатов технических наук, руководит специализированным советом МИЭТ по присуждению ученых степеней докторов и кандидатов наук. Бархоткин В.А. – автор 290 научных трудов и изобретений, в том числе одной монографии по теории приборов управления.

Профессор Бархоткин В.А. возглавляет центр формирования компетенций «Математическое моделирование и проектирование информационно-управляющих систем», созданный в ходе выполнения инновационной образовательной программы МИЭТ «Современное профессиональное образование для российской инновационной системы в области электроники».

Бархоткин В.А. – член редколлегии журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника».

За большие успехи в учебной, научной и производственной деятельности Бархоткин В.А. награжден государственными наградами – орденами Октябрьской Революции, Трудового Красного Знамени и орденом «Знак Почета».

*Желаем Вячеславу Александровичу крепкого здоровья, плодотворной работы, оптимизма и удачи во всех начинаниях.*

*Редколлегия*

## К 95-летию со дня рождения Курбатова Леонида Николаевича (15.01.1913 – 16.07.2004)

15 января 2008 г. исполнилось 95 лет со дня рождения выдающегося русского ученого в области оптики, лазерной физики, фотоэлектроники, члену-корреспонденту Академии наук СССР (Российской академии наук), академику Академии инженерных наук Российской Федерации, доктору технических наук, профессору Леониду Николаевичу Курбатову.

Л.Н.Курбатов родился в г. Скобелев (ныне г. Фергана) в дворянской семье. После окончания средней школы в 1929 г. Л.Н.Курбатов поступил на химический факультет Среднеазиатского государственного университета, но в 1931 г. был исключен в связи с арестом отца по ложному обвинению (впоследствии реабилитированного). После исключения Л.Н.Курбатов работал в геологоразведке и участвовал в освоении Алмалыкского месторождения цветных металлов. В 1932 г. Л.Н.Курбатов поступил на инженерно-физический факультет Ленинградского политехнического института, который окончил в 1936 г. по специальности химическая физика. Еще студентом Л.Н.Курбатов начал научную работу в области фотохимии и оптики адсорбированных веществ в Физическом институте Ленинградского государственного университета. После окончания аспирантуры в 1939 г. и защиты кандидатской диссертации по исследованию тонких явлений адсорбции Л.Н.Курбатов становится заведующим кафедрой общей физики Псковского педагогического института, где и проработал до начала войны. В 1941 – 1956 гг. – заведующий кафедрой физики Военно-морской медицинской академии (ВММА). С 1956 г. Л.Н.Курбатов работал в Государственном оптическом институте им. С.И. Вавилова. В послевоенные годы продолжил физические исследования в области явления адсорбции. В 1955 г. защитил докторскую диссертацию, а затем получил звание профессора Ленинградского государственного университета. В то же



время его научные интересы были направлены в область физики и техники полупроводников и прежде всего фотоэлектроники и микрофотоэлектроники, а с начала 60-х годов Л.Н.Курбатов начинает работать в области квантовой электроники. Он занимался исследованием люминесценции полупроводников, работал в области полупроводниковых лазеров и лазерной спектроскопии, оптики слоистых кристаллов, спектрохронографии в полупроводниках, фотоэмиссионной микроскопии.

После переезда в Москву Л.Н.Курбатов становится заместителем директора по научной работе НИИ-801 (НИИ прикладной физики). На этой должности он проработал с 1959 по 1986 г. Здесь в наибольшей степени раскрылся его талант руководителя большого коллектива, занимающегося целым комплексом взаимосвязанных сложнейших фундаментальных и прикладных исследований в области полупроводниковых фотоприемников и квантовой электроники. Успехи Л.Н.Курбатова и возглавляемого им коллектива позволили заложить научные

основы разработки многих приборов полупроводниковой фото- и микроэлектроники, лазерных излучателей и приборов ночного видения. Это явилось важнейшим и решающим условием внедрения образцов этих изделий в серийное производство. В дальнейшем Л.Н.Курбатов работал начальником теоретического отделения НТЦ ФГУП «НПО «Орион», а с 1993 по 2004 гг. – советником Генерального директора по науке.

Заслуги Л.Н.Курбатова в области развития отечественной физики получили широкое признание. Он награжден орденом Ленина и Октябрьской Революции, двумя орденами Трудового Красного Знамени, медалями. Л.Н.Курбатов является заслуженным деятелем науки Российской Федерации, лауреатом двух Государственных премий СССР (1970, 1985 гг.).

Талант крупного ученого и организатора органически сочетался в Л.Н.Курбатове со способностями прекрасного педагога. В течение многих лет Л.Н.Курбатов занимался плодотворной педагогической работой. Она началась еще в Ленинграде, когда Л.Н.Курбатов возглавил кафедру физики ВММА и когда стал профессором ЛГУ, а затем, после переезда в Москву, заведующим базовой кафедрой физической электроники Московского физико-технического института (1963–1988 гг.). Под руководством Л.Н.Курбатова осуществлялась подготовка и успешная защита 25 докторских и более 100 кандидатских диссертаций. Результаты активной научной деятельности Л.Н.Курбатова нашли отражение в 354 печатных трудах. К ним относятся, в частности, монография «Оптоэлектроника видимого и инфракрасного диапазонов спектра», вышедшая в 1999 г.

Л.Н.Курбатов долгие годы являлся членом Бюро Отделения общей физики и астрономии АН СССР (РАН), председателем секции «Узкозонные полупроводники» Совета по физике и химии полупроводников АН СССР (РАН) и заместителем пред-

седателя этого Совета, руководителем секции Межведомственного совета по квантовой электронике, главным редактором отраслевого журнала, членом редколлегии журналов «Физика и техника полупроводников» и «Квантовая электроника».

Следует особо сказать о замечательных человеческих качествах Л.Н.Курбатова. Он обладал редкой способностью создать атмосферу дружелюбия в возглавляемом им коллективе. Это удавалось благодаря присущему Л.Н.Курбатову чувству такта и доброжелательства в отношениях с сотрудниками, постоянного внимания к их нуждам и творческому росту.

Общеизвестны его потрясающая работоспособность и трудолюбие, честность, добросовестность, высокая эрудиция и сильно развитое чувство долга. Л.Н.Курбатов умел быстро, точно и просто охарактеризовать суть поставленной задачи, умело наметить пути ее оптимального решения и получить ожидаемые результаты. Л.Н.Курбатов прекрасно владел речью, отличавшейся точностью и образностью. Это нашло достойное выражение в его научных статьях, лекциях, в трудах по истории отечественной оптоэлектроники, в воспоминаниях о работе в НИИ прикладной физики.

Как и подобает подлинно интеллигентному человеку, Л.Н.Курбатов обладал исключительно широким кругозором. Его характеризовал неослабевающий интерес к знаниям, ко всему новому, не только к физике и вообще к естественным наукам, но и к литературе, истории, искусству. Л.Н.Курбатов предпочитал активный отдых – походы в горы Тянь-Шаня, Кавказа.

Л.Н.Курбатов прожил долгую и славную жизнь, внес неоценимый вклад в развитие отечественной науки и техники, в подготовку целой плеяды талантливых научных работников, оставил о себе добрую память. Его глубокое творческое наследие и организованные им направления исследований послужат на славу отечественной науки.

*Редколлегия*



# CONTENTS

## Fundamental researches

<i>I.V.Lavrov</i> Theory of Conductivity of Inhomogeneous Materials with Texture .....	3
--	---

## Electronic engineering materials

<i>N.G.Yaremenko, G.B.Galiev, M.V.Karachevtseva, V.G.Mokerov, V.A.Strakhov</i> Photoluminescence of GaAs Epitaxial Layers .....	10
<i>I.S.Al-Hadrami, A.N.Korolev, T.V.Semenistaya, T.N.Nazarova, V.V.Petrov</i> Research of Gas Sensitive Properties of CU-Containing IR-Pyrolyzed Polyacrylonitril .....	20

## Microelectronic devices and systems

<i>V.P.Timochenkov, V.A.Bratov</i> NRZ to NRZM Converter Based on GaAs Heterojunction Bipolar Transistors .....	26
<i>E.A.Ignatjeva, V.V.Uzdovskii, V.I.Khainovskii</i> Calculation of Constructive Parameters and Electric Potential of «Three-Diode» Vertical Integrated Spectrum-Selective Photocell .....	35
<i>N.V.Gouminov, V.I.Staroselskij</i> Precise Voltage Follower with Small Input Current on Metal-Semiconductor Field Effect Transistor .....	43

## Nanotechnologies

<i>S.K.Maksimov, K.S.Maksimov</i> Problem of Texturing of Nanomaterials. Control of Textures ...	49
--	----

## Circuit engineering and design

<i>V.Y.Kremlev, T.Y.Krupkina, A.V.Nikolaev</i> Construction of Digital Circuits Based on Elements of Capacitor-Transistor Type .....	56
--	----

## Information technologies

<i>V.N.Chetverik</i> Differential Radio Contrast as Applied to Problem of Earth Surface Radar Image Quality Assessment .....	62
<i>A.L.Pereverzev</i> Hardware Realization of One-Dimensional Median Filter with Modular Architecture .....	68

## Measurement methods and technology

<i>A.I.Filatov, A.V.Lugovskoi</i> Usage of Photorefractive Technique for Complex Three-Dimensional Determination of Electron and Thermal Parameters of Silicon Structures .....	74
<i>T.I.Khakhana, A.A.Gurskaya</i> Application of Striping Voltammetry for Control of Microimpurity Content in Synthetic Sapphire .....	79

## Brief reports

<i>B.N.Utkin, V.D.Sadkov, D.Y.Yakimov</i> Calculation of T-Shaped Absorbing Elements of Chip-Attenuators for Surface Assembling .....	84
<i>D.N.Gulidov, V.N.Ivchenko, E.V.Borodin, K.A.Seleznev</i> Function-Iteration Development of Quality Management System in Accordance with GOST R ISO 9001:2001 .....	86

## Anniversaries

Kopaev Y.V. is 70 years old .....	89
Barkhotkin V.A. is 70 years old .....	91
Kurbatov L.N. is 95 years old .....	93



# ABSTRACTS

## FUNDAMENTAL RESEARCHES

### Theory of Conductivity of Inhomogeneous Materials with Texture

*I.V.Lavrov*

The theory of conductivity of inhomogeneous materials with texture has been developed. Using the generalized effective-medium approach the tensor of electric conductivity components of the polycrystalline medium as the function of values of the tensor components of the crystallites conductivity, crystallites' orientation dispersion and the sample orientation in the laboratory coordinates system have been found. The recommendations for experimental determination of the sample basic characteristics (including the dispersion of the crystallites axes directions with reference to the texture axis) have been given.

## ELECTRONIC ENGINEERING MATERIALS

### Photoluminescence of GaAs Epitaxial Layers

*N.G.Yaremenko, M.V.Karachevtseva, V.A.Strakhov, G.B.Galiev, V.G.Mokerov*

The influence of the As pressure on the amphoteric behavior of Si-atoms during molecular beam epitaxial growth of heavily Si-doped (100), (111)A and (111)B GaAs has been investigated. The line-shape analysis of the band-edge emission spectra has been carried out, the free electron concentration and the compensation value in n-GaAs layers have been determined. It has been shown that the nature of these defects is different in the layers with (111)A and (111)B orientations.

### Research of Gas Sensitive Properties of CU-Containing IR-Pyrolyzed Polyacrylonitril

*I.S.Al-Hadrami, A.N.Korolev, T.V.Semenistaya, T.N.Nazarova, V.V.Petrov*

The samples of the pyrolyzed acrylonitril containing the copper compounds have been produced. The influence of the copper compounds content and of the temperature of the IR pyrolysis on the specific resistance and morphology of the fabricated samples' surface has been determined. The dependence of the gas-sensitivity of the produced samples on the surface morphology and specific resistance has been found.

## MICROELECTRONIC DEVICES AND SYSTEMS

### NRZ to NRZM Converter Based on GaAs Heterojunction Bipolar Transistors

*V.P.Timochenkov, V.A.Bratov*

Some aspects of designing the NRZ to NRZM converter based on GaAs heterojunction bipolar transistors have been considered. The peculiarity of the circuit is the application of inductive correction permitting to expand the converter bandwidth. The computer simulation and experimental studies of the device for 12.5 GB/s frequency rate have been performed. The experimental results well agree with the simulation results.

### Calculation of Constructive Parameters and Electric Potential of « Three-Diode » Vertical Integrated Spectrum-Selective Photocell

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

The numerical simulation of the vertically integrated photosensitive cell, intended for the matrix spectrum-selective photoelectric image converter, has been carried out. The constructive parameters and control voltages of the photocell as well as the electric potential distributions have been investigated. The surface concentrations of the accumulated photo carriers and the thermal relaxation times of the photocell *p-n-p-n* structure have been calculated.

## **Precise Voltage Follower with Small Input Current on Metal-Semiconductor Field Effect Transistor**

*N.V.Gouminov, **V.I.Staroselskij***

The voltage followers for information processing devices in UHF/SHE range, implemented on MESFET (Metal-Semiconductor-Field-Effect-Transistor) based on the  $A^{III}B^V$  semiconductor compounds, have been considered. The properties of the precision voltage follower with the transmission coefficient extraordinarily close to 1, the high linear transfer characteristic and very low input current have been analyzed.

## **NANOTECHNOLOGIES**

### **Problem of Texturing of Nanomaterials. Control of Textures**

*S.K.Maksimov, K.S.Maksimov*

The data concerning the textures of nanomaterials have been analyzed, and it has been noted that the textures arise even in cases, when there are no apparent reasons of their origin. It has been shown that the texturing problem is especially important for their medical-biological application. The connection of texturing with the shape formation of nanocrystals has been noted, and it has been emphasized that the influence of the size factor on the nanocrystal morphology is especially important for crystals with linear sizes less than 10 nm. It has been proposed to control the texture of similar crystals by the OTED method realizable in the electron microscope column.

## **CIRCUIT ENGINEERING AND DESIGN**

### **Construction of Digital Circuits Based on Elements of Capacitor-Transistor Type**

*V.Y.Kremlev, T.Y.Krupkina, A.V.Nikolaev*

The principles, benefits and bottlenecks of the logic circuits defined as the capacitor-transistor logic (CTL) have been considered. The timing waveforms of the CTL elements have been produced and D- and RS-triggers have been simulated. The comparison of the CTL elements with their CMOS analogs has been performed. The methods for improving the parameters of the logic circuits built in the CTL basis have been proposed.

## **INFORMATION TECHNOLOGIES**

### **Differential Radio Contrast as Applied to Problem of Earth Surface Radar Image Quality Assessment**

*V.N.Chetverik*

The issues of using the differential radio contrast in the SAR image quality estimation have been considered. The derivation of the relationships providing to estimate the SAR radiometric resolution in terms of the statistic approach has been presented. The charts permitting to analyze the effect of the SAR instrument basic performances upon its radiometric resolution have been given.

### **Hardware Realization of One-Dimensional Median Filter with Modular Architecture**

*A.L.Pereverzev*

The architecture of one-dimensional median filter, permitting to increase the aperture length by adding the same modules and to calculate the median at each step of the filter work, has been developed. The synthesizable Verilog-description of the proposed architecture has been designed.

## **MEASUREMENT METHODS AND TECHNOLOGY**

### **Usage of Photorefractive Technique for Complex Three-Dimensional Determination of Electron and Thermal Parameters of Silicon Structures**

*A.L.Filatov, A.V.Lugovskoi*

A photorefractive method has been investigated as a basis for the contact-free complex mapping of the electron and thermal properties of silicon structures. It has been shown that the charge-carrier mobility and lifetime, as well as the thermal diffusivity, can be measured locally in a single processing cycle at any place in the sample bulk. A procedure for simultaneous measurement of these parameters has been developed.

### **Application of Striping Voltammetry for Control of Microimpurity Content in Synthetic Sapphire**

*T.I.Khakhana, A.A.Gurskaya*

The modern methods for quality monitoring of impurity in synthetic sapphire have been analyzed. The striping voltammetry method has been offered, the algorithm of performing the analysis on an example of zinc and copper has been developed. Special attention has been paid to an extremely important stage – the test preparation. The experimental data on the choice of electric-chemical parameters of the analysis have been presented. The developed technique has been forwarded to the GOSSTANDART' bodies for certification.

## **BRIEF REPORTS**

### **Calculation of T-Shaped Absorbing Elements of Chip-Attenuators for Surface Assembling**

*B.N.Utkin, V.D.Sadkov, D.Y.Yakimov*

The topology and calculation of absorbing elements of chip-attenuators for broadband attenuation made on the basis of distributed resistive structures and intended for surface assembling have been proposed. The results of the calculations and experimental studies both on real samples of the developed items and on their large-scale models have been presented.

### **Function-Iteration Development of Quality Management System in Accordance with GOST R ISO 9001:2001**

*D.N.Gulidov, V.N.Ivchenko, E.V.Borodin, K.A.Seleznev*

The whole complex of the QOST R ISO 9001:2001 requirements has been presented as a functional interface, which «stratification» can be represented in terms of a set of the declared functions: matrix management; consensus management; account and control of activity effectiveness; processor management.