

# НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 10(159) ♦ 2013

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук

Журнал включен в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России и в систему Российского индекса научного цитирования

Издается с 1999 г.

## Главный редактор

Мальцев П. П., д.т.н, проф.

## Зам. гл. редактора

Лучинин В. В., д.т.н, проф.

Шур М., д.ф.-м.н. (США)

## Редакционный совет:

Аристов В. В., чл.-кор. РАН

Асеев А. Л., акад. РАН

Гапонов С. В., акад. РАН

Каляев И. А., чл.-кор. РАН

Квардаков В. В., чл.-кор. РАН

Климов Д. М., акад. РАН

Ковальчук М. В., чл.-кор. РАН

Нарайкин О. С., чл.-кор. РАН

Никитов С. А., чл.-кор. РАН

Рыжий В. И., чл.-кор. РАН

(Япония)

Сауров А. Н., чл.-кор. РАН

Сигов А. С., акад. РАН

Чаплыгин Ю. А., чл.-кор. РАН

Шевченко В. Я., акад. РАН

## Редакционная коллегия:

Абрамов И. И., д.ф.-м.н.

(Белоруссия)

Андреев А., к.ф.-м.н., University

of Cambridge (Великобритания)

Андриевский Р. А., д.х.н., проф.

Антонов Б. И.

Астахов М. В., д.х.н., проф.

Быков В. А., д.т.н., проф.

Волчихин В. И., д.т.н., проф.

Горнев Е. С., д.т.н., проф.

Градецкий В. Г., д.т.н., проф.

Гурович Б. А., д.ф.-м.н., проф.

Захаревич В. Г., д.т.н., проф.

Кальнов В. А., к.т.н.

Карякин А. А., д.х.н., проф.

Колобов Ю. Р., д.т.н., проф.

Кузин А. Ю., д.т.н., проф.

Мокров Е. А., д.т.н.

Панич А. Е., д.т.н., проф.

Панфилов Ю. В., д.т.н., проф.

Петросянц К. О., д.т.н., проф.

Петрунин В. Ф., д.ф.-м.н., проф.

Пожела К., д.ф.-м.н. (Литва)

Путилов А. В., д.т.н., проф.

Пятышев Е. Н., к.ф.-м.н.

Серебрянников С. В., д.т.н., проф.

Стриханов М. Н., д.ф.-м.н., проф.

Телец В. А., д.т.н., проф.

Тимошенков С. П.

Тодуа П. А., д.т.н., проф.

Шубарев В. А., д.т.н., проф.

## Отв. секретарь

Лысенко А. В.

## Редакция:

Григорин-Рябова Е. В.

Чугунова А. В.

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

## СОДЕРЖАНИЕ

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Аверин И. А., Аношкин Ю. В., Печерская Р. М. Исследование процессов деградации выходных параметров тензорезистивных структур . . . . . 2

### МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Принц А. В. Метод формирования массива длинных вертикальных полупроводниковых микротрубок . . . . . 5

Бараночников М. Л., Леонов А. В., Малых А. А., Мордкович В. Н., Мурашев В. Н., Пажин Д. М. Датчики внешних воздействий с частотным выходом на основе полевого МДПДМ-транзистора со встроенным каналом . . . . . 8

Рубан О. А., Пушкарев С. С., Галиев Г. Б., Климов Е. А., Пономарев Д. С., Хабибуллин Р. А., Мальцев П. П. Метаморфные наногетероструктуры InGaAs/InAlAs на подложках GaAs для приборов терагерцовой электроники . . . . . 12

Троицкий А. А., Березин В. М., Лукашев В. С. Электрические и оптические свойства углеродных пленок, осаждаемых электронно-лучевым методом . . . . . 15

Пустовалов А. А., Цветков Л. А. Производство радионуклида никеля-63 высокого обогащения — главное условие создания эффективных бета-вольтаических атомных батарей . . . . . 19

Колпаков А. Я., Поплавский А. И., Галкина М. Е., Токарев Д. А., Беляева А. О., Герус Ж. В. Влияние отжига в вакууме на внутренние напряжения в углеродных покрытиях, сформированных при различной ориентации подложки относительно оси потока импульсной углеродной плазмы. . . . . 25

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Войцеховский А. В., Кульчицкий Н. А., Мельников А. А., Несмелов С. Н., Дзядух С. М. Фотоприемники и фотоприемные устройства для спектрального диапазона 8...14 мкм на твердых растворах теллуридов кадмия — ртути . . . . . 29

Масальский Н. В. Характеристики субмикронного фотонного фазового модулятора на структуре "кремний на изоляторе" . . . . . 38

Мухуров Н. И., Ефремов Г. И., Жвавый С. П. Электростатические микрокоммутаторы. Часть 1. Плоскопараллельные включающие микрокоммутаторы . . . . . 42

СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ

Вишнеков А. В., Ерохин В. В. Проектирование систем на кристалле: риски и решения . . . . . 49

Contents . . . . . 55

Аннотации на русском и английском языках с 1999 г. по настоящее время находятся в свободном доступе на сайте журнала (<http://novtex.ru/nmst/>) и научной электронной библиотеки (<http://elibrary.ru>). Электронные версии полнотекстовых статей расположены на сайте журнала: с 1999 по 2011 г. в разделе "АРХИВ".

### ПОДПИСКА:

по каталогу Роспечати (индекс 79493);  
по каталогу "Пресса России" (индекс 27849)  
в редакции журнала (тел./факс: (499) 269-55-10)

### Адрес для переписки:

107076 Москва, Стромьинский пер., д. 4  
e-mail: nmst@novtex.ru

УДК 621.316.8

**И. А. Аверин**, д-р техн. наук, проф., зав. каф.,  
**Ю. В. Аношкин**, канд. техн. наук, доц.,  
**Р. М. Печерская**, д-р техн. наук, проф., декан.,  
ФГБОУ ВПО "Пензенский государственный  
университет", e-mail: micro@pnzgu.ru,  
pguurock@yandex.ru, fenr@pnzgu.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕГРАДАЦИИ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫХ СТРУКТУР

*Поступила в редакцию 30.04.2013*

*Установлены механизмы, вызывающие деградацию выходных параметров тензорезистивных структур во времени. Разработаны методика определения концентрации кислорода в тензорезистивных структурах с использованием Фурье-спектроскопии и модель стабилизации выходных параметров тензорезистивных структур на основе хромоникелевых сплавов.*

**Ключевые слова:** резистивная структура, процесс деградации, ИК-Фурье спектрометр, модели, концентрация, сопротивление

В настоящее время наряду с изучением свойств полупроводников [1] ведутся исследования проводниковых материалов, используемых для изготовления чувствительных элементов датчиков давления в ракетно-космической промышленности. Надежность современных информационно-измерительных приборов определяется стабильностью их параметров в условиях жесткой эксплуатации, например, при высоких температурах — порядка 800 °С, что неприемлемо для полупроводниковых материалов. Основными параметрами тензорезистивных структур являются номинальное сопротивление в процессе эксплуатации и время наработки на отказ. Таким образом, изучение процессов деградации свойств материалов для повышения стабильности параметров информационно-измерительных приборов является актуальной проблемой микроэлектроники.

Цель работы — повышение надежности работы информационно-измерительных приборов на основе тензорезистивных структур, выполненных в металлопленочном исполнении. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) исследовать процессы деградации выходных параметров тензорезистивных структур в процессе эксплуатации, используя оригинальную методику

определения концентрации кислорода в тензорезистивных структурах методом Фурье-спектроскопии;

2) разработать модель стабилизации выходных параметров тензорезистивных структур с использованием хромоникелевых сплавов, а на ее основе методику управления выходными параметрами тензорезистивных структур за счет режимов конденсации.

Тензорезистивные структуры на основе хромоникелевых сплавов различного состава синтезировали методом термического испарения в вакууме на подложках из ситалла. Контактные площадки к тензорезистивным структурам формировали из алюминия и меди. Форму, размеры тензорезистивных структур и контактных площадок задавали с помощью биметаллических масок [2].

Исследование процессов деградации параметров тензорезистивных структур проводили на основе анализа концентрации кислорода в пленках тензорезистивных структур с использованием оригинальной методики на Фурье-спектрометре и разработанной теоретической модели. Сопротивление тензорезистивных структур исследовали в процессе их хранения на специализированном автоматизированном лабораторном комплексе, обеспечивающем многоканальные автоматизированные измерения.

Рост сопротивления тензорезистивных структур в процессе хранения и эксплуатации связан с самоокислением поверхности пленки, о чем свидетельствуют данные, приведенные в работах [3, 4] применительно к металлическим пленкам. Процессы окисления хромоникелевых сплавов реализуются в два этапа: на первом этапе происходит адсорбция кислорода на поверхности пленки, приводящая к образованию сплошной окисной пленки; на втором этапе осуществляется диффузия кислорода из окисной пленки в объем пленки тензорезистивной структуры. В поликристаллических материалах кислород диффундирует по границам зерен, так как плотность пленок может составлять меньше 90 % от плотности монокристалла [5], а затем в объем кристаллитов по вакансиям. Диффузия кислорода активизирует диффузию точечных дефектов в объеме пленки. Со временем интенсивность диффузии атомов кислорода в пленке убывает за счет уменьшения концентрации вакансий в узлах кристаллической решетки, не занятых кислородом. Процесс диффузии кислорода закончится, когда все вакансии в кристаллической решетке заполнены. Это соответствует равновесному распределению кислорода по всему объему пленок тензорезистивных структур. Временная стабилизация свойств пленок наступает, когда вакансии в

подрешетках никеля и хрома заполняются кислородом [2]. Его предельная концентрация определяется условиями получения пленок тензорезистивных структур, которые задают концентрацию точечных дефектов в кристаллической решетке.

По мере протекания диффузии концентрация свободных электронов уменьшается, а сопротивление пленки тензорезистивной структуры возрастает. Следовательно, процессы самоокисления вызывают увеличение сопротивления тензорезистивных структур как вследствие увеличения интенсивности рассеяния носителей заряда за счет заполнения кислородом вакансий и образования изолирующей фазы на границах зерен пленки, так и за счет уменьшения концентрации носителей заряда вследствие их захвата атомами кислорода [2].

Концентрацию кислорода в пленках тензорезистивных структур определяют на основе разработанной методики с использованием Фурье-спектрометрии [6]. Типичный спектр пленки представлен на рис. 1. Штриховой линией показана область (от 600 до 700  $\text{см}^{-1}$ ), в которой исследовали концентрацию кислорода в кристаллической структуре пленки. В рамках разработанной модели концентрация кислорода в пленках в зависимости от интенсивности спектра определяется по выражению:

$$N_{\text{O}_2}(I_{\text{от.ед.}}) = \frac{N_0}{1 + K \exp\left(-\frac{E_a I_{\text{от.ед.}}}{kT}\right)}, \quad (1)$$

где  $N_0 = 7,64 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$  — концентрация кислорода (режим эталон — воздух для Фурье-спектрометра);  $K$  — эмпирический коэффициент (для нихрома равен 20);  $E_a = 0,280 \text{ эВ}$  — энергия активации колебания атомов кислорода в кристаллической решетке;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — температура;  $I_{\text{от.ед.}}$  — относительная интенсивность,

$$I_{\text{от.ед.}} = \frac{I}{I_0}, \quad (2)$$

где  $I$  — интенсивность, соответствующая волновому числу колебаний кислорода;  $I_0$  — минимальное значение интенсивности спектра.

Процесс перемещения атомов кислорода с поверхности пленки тензорезистивной структуры в ее объем описывается моделью диффузии для полубесконечного твердого тела, так как кислород в объем пленки диффундирует из атмосферы с постоянным содержанием кислорода [7]. Концентрация продиффундирующего кислорода с течением времени изменяется согласно выражению

$$N(d, t) = N_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{d}{2\sqrt{Dt}}\right), \quad (3)$$

Значения эмпирических коэффициентов для расчета коэффициента диффузии

$A, \text{ м}^2/\text{с} \cdot \text{К}^2$	$B, \text{ м}^2/\text{с} \cdot \text{К}^2$	$C, \text{ м}^2/\text{с} \cdot \text{К}^2$	$F, \text{ м}^2/\text{с} \cdot \text{К}$	$G, \text{ м}^2/\text{с} \cdot \text{К}$	$H, \text{ м}^2/\text{с}$
$1,029 \cdot 10^{-4}$	$-4,314 \cdot 10^{-5}$	$9,032 \cdot 10^{-5}$	-0,331	-0,093	205,667

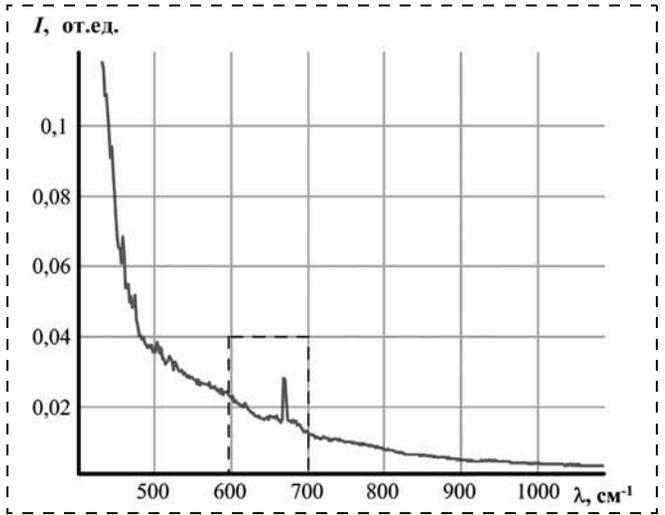


Рис. 1. Фурье-спектр пленки тензорезистивной структуры на основе хромоникелевых сплавов

где  $d$  — толщина пленки тензорезистивной структуры,  $D$  — коэффициент диффузии кислорода,  $t$  — время воздействия кислорода на пленку тензорезистивной структуры.

На основании экспериментальных и теоретических результатов исследований с учетом условий конденсации тензорезистивных структур определены коэффициенты диффузии кислорода в объем пленки:

$$D(T_{\text{исп}}, T_{\text{п}}) = AT_{\text{исп}}^2 + BT_{\text{п}}^2 + CT_{\text{исп}}T_{\text{п}} + FT_{\text{исп}} + GT_{\text{п}} + H, \quad (4)$$

где  $T_{\text{исп}}$ ,  $T_{\text{п}}$  — температура испарения исходной загрузки и подложки соответственно;  $A, B, C, F, G, H$  — эмпирические коэффициенты, значения которых представлены в таблице.

На рис. 2 (см. третью сторону обложки) представлена зависимость коэффициента диффузии кислорода в пленках на основе хромоникелевых сплавов от условий конденсации.

Следовательно, возможно управление значениями коэффициента диффузии кислорода в пленках тензорезистивных структур за счет выбора условий конденсации, а следовательно, процессами деградации параметров пленок тензорезистивных структур.

В работах [4, 7–9] представлена модель изменения сопротивления тензорезистивных структур в процессе хранения в виде двух составляющих: постоянной составляющей сопротивления  $R_{\text{пост}}$ , не зависящей от времени  $t$ , и переменной  $R_{\text{пер}}$ , являющейся функцией времени:

$$R(t) = R_{\text{пост}} + R_{\text{пер}}(t).$$

Постоянная составляющая сопротивления тензорезистивных структур определяется свойствами материала тензорезистивной пленки и переходным

сопротивлением электрических контактов и тензорезистивной пленки:

$$R_{\text{пост}} = R_0 \exp\left(\frac{q\varphi_{\text{к}}}{kT}\right), \quad (5)$$

где  $R_0$  — сопротивление резистивной структуры сразу после напыления;  $\varphi_{\text{к}}$  — разность потенциалов на границе резистивная пленка—электрические контакты.

Переменная составляющая сопротивления тензорезистивных структур зависит от изменений концентрации и подвижности носителей заряда.

Атомы кислорода в пленках тензорезистивных структур выступают в роли ловушек захвата носителей заряда, поэтому с течением времени концентрация носителей заряда уменьшается. Другим фактором, обуславливающим старение пленок, являются дефекты кристаллической решетки, определяющие интенсивность рассеяния носителей заряда. Поэтому переменную составляющую представим в следующем виде:

$$R_{\text{пер}} = \frac{l}{bd} \frac{1}{q\Delta n\Delta\eta}, \quad (6)$$

где  $l$  и  $b$  — длина и ширина тензорезистивной структуры соответственно;  $\Delta n$  и  $\Delta\eta$  — изменения концентрации носителей заряда и их подвижности с течением времени.

Так как атомы кислорода выступают в виде ловушек захвата носителей заряда, то

$$\Delta n = n_0 - N(d, t), \quad (7)$$

где  $n_0$  — концентрация носителей заряда сразу после напыления.

Выразим общее сопротивление тензорезистивных структур через условия синтеза:

$$R(T_{\text{исп}}, T_{\text{п}}, t) = R_0(T_{\text{исп}}, T_{\text{п}}) \exp\left(\frac{q\varphi_{\text{к}}}{kT}\right) + \frac{l}{bd} \frac{\sqrt{2m_e U} \times q^{3/2} [n_0 - N(T_{\text{исп}}, T_{\text{п}}, t)] B_{\eta}(T_{\text{п}}) \times \rightarrow \frac{1}{D_{\beta}(T_{\text{исп}}, T_{\text{п}}) (1 + D_{\beta}(T_{\text{исп}}, T_{\text{п}}))} \times V, \quad (8)$$

где  $B_{\eta}(T_{\text{п}})$  — эмпирический коэффициент, характеризующий подвижность носителей заряда;  $V$  — объем кластеров, определяется из результатов исследований морфологии поверхности пленок методом сканирующей зондовой микроскопии;  $D_{\beta}(T_{\text{исп}}, T_{\text{п}})$  — фрактальная размерность морфологии пленок тензорезистивных структур.

На рис. 3 представлены экспериментальные данные и рассчитанные значения изменения сопротивления тензорезистивных структур от времени эксплуатации.

Правомерность разработанной модели стабилизации выходных параметров тензорезистивных

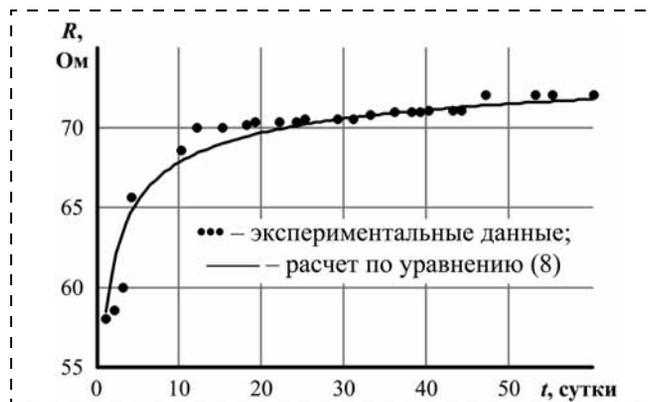


Рис. 3. Зависимость изменения сопротивления тензорезистивных структур от времени эксплуатации

структур с использованием хромоникелевых сплавов подтверждается хорошим совпадением экспериментальных и теоретических значений и значением коэффициента корреляции Пирсона, равного 0,960.

Таким образом, на основе экспериментальных и теоретических исследований разработана модель стабилизации выходных параметров тензорезистивных структур с использованием хромоникелевых сплавов, что позволило создать методику повышения надежности и стабильности функционирования тензорезистивных структур.

*Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009—2013 годы.*

#### Список литературы

1. Аверин И. А., Блохин Ю. Н., Луцкая О. Ф. Термодинамическое исследование условий синтеза слоев твердых растворов  $PbS_{1-x}Se_x$  // Неорганические материалы. 1988. Т. 24, № 2. С. 219—222.
2. Аверин И. А. Управляемый синтез гетерогенных систем: технология и свойства: дис. ... д-ра техн. наук. Пенза, 2007. 381 с.
3. Аверин И. А., Печерская Р. М. Контролируемое изменение эксплуатационных характеристик чувствительных элементов и их временной стабильности // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 1. С. 20—23.
4. Аверин И. А., Аношкин Ю. В., Печерская Р. М. Влияние отжига на морфологию поверхности и выходные параметры резистивных структур // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2008. Вып. 3. С. 104—109.
5. Аверин И. А., Печерская Р. М. Управление составом многокомпонентных систем // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. 2006. № 5. С. 184—191.
6. Аверин И. А., Аношкин Ю. В., Коновалов А. Н., Печерская Р. М. Физико-математическая модель определения концентрации кислорода в пленках резистивных структур // Надежность и качество: Труды международного симпозиума. Пенза, 2011. С. 278—279.
7. Аношкин Ю. В. Технология получения резистивных структур на низкоразмерном уровне: автореф. дис. канд. техн. наук: защищена 16.12.10; ПензГУ. Пенза, 2010. 25 с.
8. Аверин И. А., Волохов И. В., Мокров Е. А., Печерская Р. М. Влияние переходных процессов в тонкопленочной гетероструктуре на надежность чувствительных элементов тензорезисторных датчиков давления // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2008. № 2. С. 123—127.
9. Аверин И. А., Аношкин Ю. В., Печерская Р. М. Исследование поверхностных слоев резистивных структур на низкоразмерном уровне // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 1. С. 25—26.

УДК 57.08

**А. В. Принц**<sup>1, 2</sup>, мл. науч. сотрудник,  
<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт физики  
полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского  
отделения РАН, г. Новосибирск,  
<sup>2</sup> ООО "Новосибирские нанотехнологии",  
г. Новосибирск, e-mail: al@isp.nsc.ru

## МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ МАССИВА ДЛИННЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИКРОТРУБОК

*Поступила в редакцию 28.03.2013*

*Разработан метод изготовления массива вертикальных полупроводниковых микроотрубок, свернутых из напряженных полупроводниковых бипленок. В качестве вспомогательной подъемной силы используется сила Архимеда в жидкости. Созданные массивы трубок могут быть использованы как основа устройств для массовой микроинъекции в живые клетки.*

**Ключевые слова:** полупроводниковые нанотрубки, микроотрубки, микроинъекция

Интенсивное развитие биологических наук требует нового инструментария. Для решения ряда задач необходимо вводить в живые клетки различные вещества, наиболее востребовано введение ДНК, т. е. трансфекция, которая является ключевой операцией в генетической инженерии. Микроинъекция является прямым и наиболее универсальным методом введения веществ в клетку [1], эффективность микроинъекционной трансфекции достигает 100 %, не зависит от типа клеток и вводимого вещества. Основной недостаток микроинъекционной трансфекции — малая производительность, вызванная тем, что микроинъекция осуществляется в каждую клетку индивидуально. Кроме того, само изготовление отдельных стеклянных капилляров, стандартно используемых для микроинъекций, также весьма трудоемко и плохо поддается автоматизации.

Актуальна задача создания устройств для массовой микроинъекции. Для эффективной массовой микроинъекции идеальны двумерные массивы вертикальных нанотрубок, когда ось трубки перпендикулярна плоскости подложки, что открывает возможность одновременной работы с большим числом клеток. Методу создания таких массивов посвящена статья.

Известны полупроводниковые нанотрубки [2–5], свернутые из сверхтонких пленок, которые пока-

зали свою эффективность и малоинвазивность при работе с клетками [6, 7]. Особенности таких трубок являются высокие воспроизводимость геометрических параметров и механическая прочность, возможность массового изготовления с использованием развитых полупроводниковых технологий. Диаметр формируемых трубок определяется толщиной сворачиваемой гетеропленки и значением упругих напряжений в ней [2].

Высокая прочность микроотрубок, свернутых из пленок Si/SiGe, была показана с использованием микроманипуляции под сканирующим электронным микроскопом [8]. Расчеты также показывают, что прочность микро- и нанотрубок на несколько порядков превышает необходимую для прокалывания клеток [9].

Одно из главных преимуществ таких полупроводниковых трубок перед стеклянными капиллярами — это тонкие стенки, толщиной 1...10 нм, что обеспечивает малоинвазивное проникновение в клетку. Прикладывая небольшие усилия вдоль оси трубок, удается прокалывать не только клетки животных, но даже толстые оболочки растительных клеток [6, 7].

Сформированные путем сворачивания напряженных пленок трубки располагают на поверхности полупроводниковой подложки. В работах [6, 7] для получения выступающих за подложку трубок и разделения подложки с трубками на индивидуальные чипы было использовано раскалывание подложки по предварительно сформированным надпилам с обратной стороны. Однако таким методом формируют только линейные массивы — трубки лежат на подложке и расположены в один ряд, это существенно ограничивает число трубок в массиве, а их горизонтальное расположение создает трудности для массовой микроинъекции. Для массовой микроинъекции нужны двумерные массивы вертикальных микроотрубок, когда ось трубки перпендикулярна плоскости подложки.

Технология формирования полупроводниковых трубок довольно подробно изложена в статьях и обзорах [2–4], перечислим основные операции.

1. Выращивание полупроводниковой гетероструктуры с многослойной напряженной пленкой и жертвенным слоем. В составе многослойной пленочной структуры при ее изготовлении выращивают не менее двух механически напряженных друг относительно друга слоев и жертвенный слой.

В данной работе использовались следующие структуры на подложках из Si и GaAs:

а) эпитаксиальная структура на подложке GaAs (100), молекулярной эпитаксией выращивали сле-

дующие слои: жертвенный слой AlAs — 18 нм, слой  $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$  — 6 нм, и верхний слой GaAs — 9 нм;  
 б) структура, выращенная газофазной (CVD) эпитаксией на кремниевой (100) подложке, в данном случае жертвенным слоем была сама подложка из нелегированного кремния, напряженные слои, сильно легированные бором  $p^+\text{SiGe}$  — 15 нм и слой  $p^+\text{Si}$  — 25 нм.

2. Литография с последующим травлением задает контур бипленки, из которой формируются трубки.

3. Селективное удаление жертвенного слоя для отделения напряженной бипленки от подложки и последующего ее сворачивания.

Ранее был предложен способ [10] подъема свернутых трубок относительно подложки (рис. 1, см. четвертую сторону обложки). Мы развили этот способ в целях формирования двумерных массивов вертикальных трубок.

Суть способа заключается в том, что помимо области пленки, предназначенной для сворачивания в трубку, формируют дополнительную область, изгиб которой приводит к поднятию трубок над подложкой. При удалении жертвенного слоя сначала из напряженной бипленки на подложке сворачивают трубки, которые затем поднимаются за счет изгиба дополнительной области бипленки (петли) у одного из концов трубки (рис. 1).

К недостатку данного способа относится трудность подбора размера петли для точного вертикального позиционирования трубки. Петля изгибается практически с таким же радиусом изгиба, как и трубка, соответственно, закрепленная на петле трубка, достигнув вертикального положения, продолжает обычно двигаться дальше и переворачивается. В результате, вместо ряда вертикальных трубок формируется ряд горизонтальных встречно ориентированных трубок (рис. 2). На рис. 2 представлены два ряда таких Si/SiGe трубок, подъем которых происходил во встречных направлениях. В данной структуре жертвенным слоем является нелегированная кремниевая подложка, поэтому поверхность подложки под трубками имеет выраженный рельеф травления.

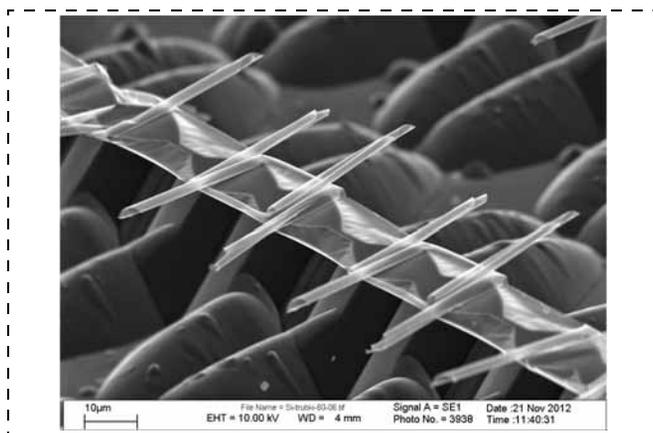


Рис. 2. Электронно-микроскопическая фотография массива кремниевых Si/SiGe (15 нм/25 нм) трубок диаметром 2 мкм, для которых осуществился "подъем с переворотом". Использовался литографический рисунок, изображенный на рис. 4, а (см. четвертую сторону обложки)

Для фиксации трубок в вертикальном положении в настоящей работе дополнительно формировали стопорный элемент, который препятствует перевороту и удерживает трубки вертикально (рис. 3, см. четвертую сторону обложки). В качестве стопорного элемента использовали полосы из резиста Su-8, которые изготавливали с помощью дополнительной литографии до сворачивания трубок. Su-8 — это основанный на эпоксидных смолах негативный фоторезист. Этот резист достаточно толстый (в данном случае 10...20 мкм), что позволяет ему служить опорой для трубок и препятствовать перевороту.

Дизайн литографической маски для формирования областей бипленки был разработан таким образом, чтобы реализовать направленное сворачивание и сформировать петлю изгиба (рис. 4, см. четвертую сторону обложки). На рис. 4, а стрелками обозначены направления облегченного сворачивания трубок, соответствующие кристаллографическим направлениям типа (100) [11]. Формирование трубок преимущественно начинается с ровных и протяженных участков. Таким образом, сворачивание трубок идет в направлениях, обозначенных стрелками, а петля формируется в перпендикулярном направлении уже после окончательного сворачивания трубок, петля задает вектор подъема трубок.

После формирования областей бипленки и перед травлением жертвенного слоя формировали стопорные элементы из Su-8. Процедуру фотолитографии с резистом Su-8 осуществляли по рекомендованной производителем резиста (MicroChem Corp) методике. Будучи полностью заполимеризованным, Su-8 сходен по прочности и химическим свойствам с эпоксидной смолой, что позволяет осуществлять травление жертвенного слоя, не воздействуя на Su-8.

Упругой энергии петли часто не хватает в случае подъема длинных трубок, а также в случае повышенной адгезии трубок к подложке. Проблема с поднятием трубок возникает и при наличии дефектов исходной пленки или дефектов литографии. Для решения данных проблем и увеличения числа вертикально поднятых трубок вплоть до 100 %, мы предложили использовать дополнительную подъемную силу — Архимедову силу. Эта добавочная сила обеспечивает подъем даже тех трубок, которые в силу различных причин "залипли" на подложке. В результате удается осуществить поднятие всех трубок.

Сворачивание происходит в жидкостном травителе, поэтому полость трубки заполнена жидкостью (изначально травителем, а затем жидкостью, использованной для промывания от травителя). Если структуру со свернутыми трубками переместить в жидкость более высокой плотности, чем жидкость, заполняющая полость трубок, то возникает Архимедова сила — подъемная сила, которая стремится вытолкнуть трубку на поверхность. Поскольку трубки посредством гибкой петли связаны с подложкой, поднимается только свободный конец трубки, таким образом трубка становится вертикальной. При помещении структуры в жидкость с большей плотностью, чем жидкость внутри трубок, подъем происходит очень быстро — менее, чем за секунду.

Подъемная сила  $F = (\rho_{\text{тр}} - \rho_{\text{сн}})gV$ , где  $\rho_{\text{тр}}$  и  $\rho_{\text{сн}}$  — плотность жидкости внутри трубок и снаружи;  $V$  — объем жидкости внутри трубки;  $g$  — ускорение свободного падения.

Очевидно, что чем больше разность плотностей жидкостей внутри и снаружи трубок, тем больше подъемная сила. Для многих случаев достаточно выталкивающей силы, возникающей при разнице плотностей жидкостей в 10 %, как у изопропилового спирта (плотность 900 г/л) и воды (плотность 1000 г/л).

Для получения большей подъемной силы мы использовали жидкость фирмы 3М — Novex 7200, она отличается очень высокой плотностью — 1430 г/л. Плотности изопропилового спирта и Novex 7200 различаются почти в 1,5 раза. (Novex 7200 — реагент фирмы 3М — Novex<sup>TM</sup> 7200 Engineered Fluid, представляющий собой этокси-нонафторбутан (ethoxy-nonafluorobutane)  $C_4F_9OC_2H_5$ , который является химически инертной средой.)

На рис. 5 представлено электронно-микроскопическое изображение массива вертикальных InGaAs/GaAs трубок. К сожалению, под пучком электронов в электронном микроскопе происходит интенсивная зарядка высокоомного резиста Su-8 и слабопроводящих трубок, возникают электростатические силы, которые изгибают и даже ломают трубки при длительном воздействии электронного пучка. Этот эффект значительно затрудняет получение контрастных электронно-микроскопических снимков.

Благодаря использованию дополнительной силы для подъема трубок нам удалось увеличить выход годных вертикальных нанотрубок в массиве практически до 100 %. Соответственно, плотность массива вертикальных трубок при использованных нами литографических размерах достигает 70...80 тыс. трубок на  $1 \text{ см}^2$ , чего вполне достаточно для массовой трансфекции массива клеток. В реализованном нами технологическом маршруте длина трубок составляет 40 мкм. Для того чтобы делать микроинъекции в клеточное ядро, нужны относительно длинные трубки. Для инъекций в цитоплазму достаточно длины 3—5 мкм.

Для работы с клетками важна высокая механическая прочность трубок, тонкие стенки (острота) и контролируемый малый диаметр (от 100 нм до 2 мкм) трубок. С использованием этой технологии была

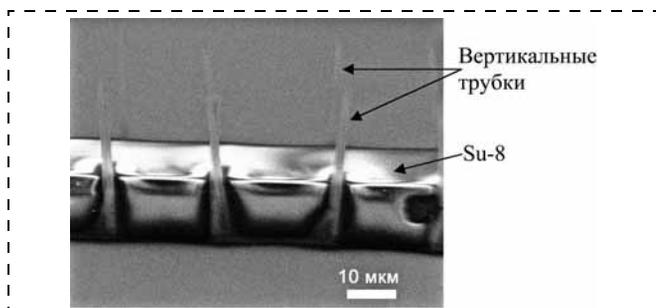


Рис. 5. Электронно-микроскопическая фотография массива вертикальных нанотрубок, поднимаемых на пленочных петлях. Ряды трубок стоят вдоль створной полосы из Su-8. Плотность массива 70 тыс. трубок на  $1 \text{ см}^2$ . Диаметр трубок 1,2 мкм. Использовалась эпитаксиальная структура на GaAs (100) подложке: AlAs — 18 нм,  $In_{0,2}Ga_{0,8}As$  — 6 нм, GaAs — 9 нм

продемонстрирована возможность введения в живые клетки плазмидной ДНК с помощью пассивной диффузии. Созданные массивы трубок можно применять для микроинъекций не только самих по себе, но они могут стать основой для комплексных устройств, содержащих дополнительно микронасос. Наиболее важная область применения — трансфекция первичных культур и эмбриональных клеток, которые чувствительны к химическим методам трансфекции.

Очевидно имеются и другие области практического применения, например, зонды для диагностики процессов в клетке, в том числе электрические зонды; микро- и нанодозаторы; наноинденторы и т. п. [4, 12—14].

Автор благодарит Т. А. Гаврилову за электронно-микроскопические фотографии, группу А. И. Торопова за предоставление эпитаксиальной структуры В. А. Селезнева, В. Я. Принца и С. В. Голода за обеспечение результатов.

Работа была поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации (Программа "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013 годы", гос. контракт № 16.513.11.3020).

#### Список литературы

- Zhang Y., Yu L. C. Single-cell microinjection technology in cell biology // Bioessays. 2008. Jun. Vol. 30 (6): 606—10.
- Prinz V. Ya., Seleznev V. A., Gutakovskiy A. K., Chehovskiy A. V., Preobrazenskii V. V., Putyato M. A., and Gavrilo T. A. Free-standing and overgrown InGaAs/GaAs nanotubes, nanohelices and their arrays // Physica E. 2000. Vol. 6 (1—4). P. 828—831.
- Prinz V. Ya., Seleznev V. A., Gutakovskiy A. K. Self-formed InGaAs/GaAs Nanotubes: Concept, Fabrication, Properties // Proc. of the 24th International Conference on the Physics of Semiconductors, edited by D. Gershoni (World Scientific, Singapore), 1998.
- Принц В. Я., Селезнев В. А., Чеховский А. В. Самоформирующиеся полупроводниковые микро- и нанотрубки // Микросистемная техника. 2003. № 6. С. 29—34.
- Prinz V. Ya., Seleznev V. A., Samoylov V. A., Gutakovskiy A. K. Nanoscale engineering using controllable formation of ultra-thin cracks in heterostructures // Microelectronic Engineering. 1996. Vol. 30. P. 439—442.
- Prinz A. V., Prinz V. Ya. Application of semiconductor micro- and nanotubes in biology // Surface Science. 2003. Vol. 532—535. P. 911—915.
- Prinz A. V., Prinz V. Ya., Seleznev V. A. Semiconductor micro- and nanoneedles for microinjections and ink-jet printing // Microelectronic Engineering. 2003. Vol. 67—68. P. 782—788.
- Li Zhang, Lixin Dong and Bradley J. Nelson Bending and buckling of rolled-up SiGe/Si microtubes using nanorobotic manipulation // Applied Physics Lett. 2008. Vol. 92. 243102.
- Копылов А. В., Принц В. Я. Графен-полупроводниковые трубчатые иглы для работы с живыми клетками // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2010. Т. 5, № 1. С. 91—96.
- Принц В. Я., Голод С. В., Принц А. В. Полая игла в интегральном исполнении и ее изготовление: пат. России 2341299, 2008.12.20.
- Golod S. V., Prinz V. Ya., Mashanov V. I., Gutakovskiy A. K. Fabrication of conducting GeSi/Si micro- and nanotubes and helical microcoils // Sem. Sci. Techn. 2001. Vol. 16. P. 181—185.
- Prinz V. Y., Seleznev V. A., Prinz A. V., Kopylov A. V. 3D heterostructures and systems for novel MEMS/NEMS // Sci. Technol. Adv. Mater. 2009. Vol. 10. 034502.
- Prinz V. Ya. A new concept in fabricating building blocks for nanoelectronic and nanomechanic devices // Microelectron. Eng. 2003. Vol. 69. P. 466.
- Корнеев И. А., Принц В. Я., Селезнев В. А. Чипы с полупроводниковыми трубками — зондами для сканирующей туннельной микроскопии // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 4. С. 5—8.

**М. Л. Бараночников**<sup>1</sup>, стар. науч. сотр.,  
e-mail: baranochnikov@mail.ru,

**А. В. Леонов**<sup>1</sup>, вед. инж., e-mail: lave@sci.lebedev.ru,

**А. А. Малых**<sup>2</sup>, аспирант,  
e-mail: malykhanton21@gmail.com,

**В. Н. Мордкович**<sup>1</sup>, д-р физ.-мат. наук, проф.,  
зав. лаб., e-mail: mord@sci.lebedev.ru,

**В. Н. Мурашев**<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф.,  
e-mail: murashev@mtu-net.ru,

**Д. М. Пажин**<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук, науч. сотр.,  
e-mail: razdim@gambler.ru,

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук, г. Черноголовка,

<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", г. Москва

## ДАТЧИКИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ С ЧАСТОТНЫМ ВЫХОДОМ НА ОСНОВЕ ПОЛЕВОГО МДПДМ-ТРАНЗИСТОРА СО ВСТРОЕННЫМ КАНАЛОМ

Поступила в редакцию 07.03.2013

Показано, что полевой транзистор со встроенным каналом и управляющей системой типа металл — диэлектрик — полупроводник — диэлектрик — металл может функционировать как чувствительный элемент датчиков внешних воздействий (таких как магнитное поле, температура, радиация), преобразующих воздействия в цифровой сигнал. Датчик основан на принципе изменения частоты автогенератора, в схему которого в качестве нагрузки, изменяющейся при внешних воздействиях, включен упомянутый транзистор. В качестве основы автогенератора может быть использована как специальная ИС, так и эффект самовозбуждения в чувствительном элементе, благодаря особенностям его ВАХ на участке лавинного умножения. Датчики изготовлены по технологии кремний-на-изоляторе.

**Ключевые слова:** датчик, преобразование воздействия — частота, кремний-на-изоляторе

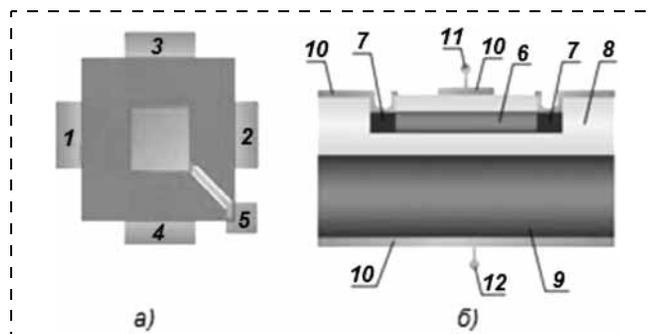
### Введение

В последнее время наблюдается определенный интерес к разработке микроэлектронных датчиков, в которых изменение напряжения или силы тока, индуцированные различными внешними воздействиями, преобразуются в изменение частоты выходного сигнала. Преобразование воздействие — частота способно улучшить чувствительность датчиковых устройств, повысить их помехозащищенность, упростить преобразование аналогового воздействия в цифровой сигнал. Конструктивно преобразование обычно реализуется в схеме автоге-

нератора, на вход которого включают чувствительный элемент (ЧЭ). Изменение характеристик ЧЭ под влиянием внешних воздействий изменяет выходную частоту генератора пропорционально интенсивности воздействия [1—4]. В этих работах для контроля различных внешних воздействий использовали чувствительные элементы различной физической природы и конструктивного исполнения (магниторезисторы, элементы Холла, пьезорезисторы, тензодиоды и др.).

В данной работе демонстрируются возможности достаточно универсального чувствительного элемента, способного преобразовывать в частоту различные внешние воздействия, такие, например, как магнитное поле, температура, ионизирующая радиация. Такой чувствительный элемент был первоначально предложен для измерения магнитного поля [5]. Его конструкция объединяет свойства традиционного элемента Холла и транзистора со встроенным каналом и управляющей полевой системой типа металл — диэлектрик — полупроводник — диэлектрик — металл (МДПДМ). Использование такого двухзатворного ЧЭ в схеме с автогенератором позволяет преобразовывать воздействие магнитной индукции в изменение частоты выходного сигнала [6, 7]. Ниже будет показано, что существуют и иные возможности преобразования индукции в частоту, и что описанный в работе [5] ЧЭ способен также преобразовывать в частоту температурные и радиационные воздействия.

На рис. 1 показана конструкция представленного в работе [5] ЧЭ. Элемент изготовлен по технологии "кремний-на-изоляторе" (КНИ). В слое кремния  $n$ -типа толщиной 0,2 мкм были сформированы области размером  $500 \times 500$  мкм. Для получения омических токоподводящих и измерительных контактов противоположные участки кремния размером  $50 \times 50$  мкм, расположенные посередине сторон квадрата, были легированы фосфором до уровня  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ . На поверхности кремния был выращен термический оксид толщиной 250 Å. Поверх соответствующей пленки  $\text{SiO}_2$  был осажден Al (верхний затвор). Нижняя полевая система образована слоем скрытого диэлектрика  $\text{SiO}_2$  КНИ-структуры



**Рис. 1. Конструкция двухзатворного чувствительного элемента:**  
*а* — вид сверху (1, 2 — токовые электроды; 3, 4 — дополнительные боковые электроды; 5 — электрод верхнего затвора);  
*б* — поперечное сечение (6 — рабочий слой ( $n$ -Si); 7 — омические контакты ( $n^+$ -Si); 8 —  $\text{SiO}_2$ ; 9 — подложка ( $n$ -Si); 10 — пленка Al; 11 — верхний затвор; 12 — нижний затвор)

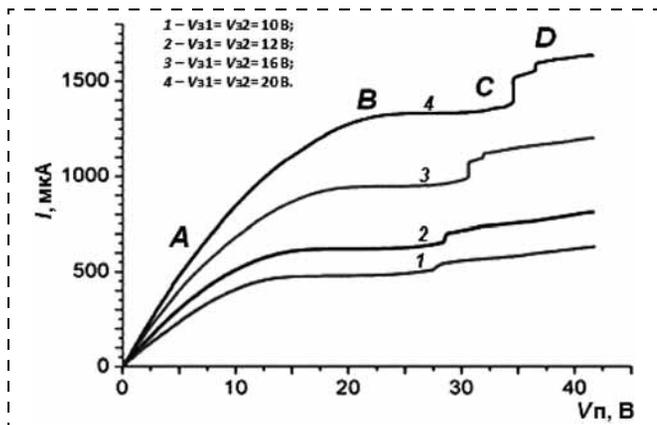


Рис. 2. Семейство ВАХ двухзатворного ЧЭ:

$V_{з1}$  — потенциал, поданный на верхний затвор;  $V_{з2}$  — потенциал, поданный на нижний затвор

толщиной 0,4 мкм и кремниевой подложкой, играющей роль затвора.

Рисунок 2 иллюстрирует типичную ВАХ двухзатворного ЧЭ. Видно, что при сравнительно низких напряжениях питания и потенциала на затворах наблюдаются типичные для полевых МДП-транзисторов участки линейного роста и насыщения тока (участки А и В). Однако ВАХ ЧЭ имеет очевидные отличия от ВАХ МДП-транзисторов в области более высоких напряжений, когда в канале ЧЭ наблюдается процесс ударной ионизации (участок С) носителей и начинает развиваться лавинный пробой (участок D). Физически эти особенности связаны с тем, что перенос тока в кремниевом канале ЧЭ происходит по двум областям, обогащенным электронами и расположенным вблизи границ обоих диэлектриков, и что дырки, рожденные ударной ионизацией, не могут покинуть канал ЧЭ и мигрировать в подложку ввиду наличия диэлектрического барьера. Детальный анализ физики протекающих процессов не входит в задачу настоящей работы. Для дальнейшего важно лишь указать, что в области ударной ионизации там, где происходят скачкообразные изменения формы ВАХ, наблюдаются осцилляции тока. В связи с этим в дальнейшем изучаются две возможности построения датчиков с частотным выходом: датчик, в котором ЧЭ соединяется с автогенератором и работает на первых двух участках ВАХ, и датчик, функционирующий в области лавинного размножения носителей и осцилляции тока (в этом случае автогенератором является сам ЧЭ). Для изучения были изготовлены макеты датчиковых устройств в виде микросборок.

### Датчики с ЧЭ, включенными в схему автогенератора

Схематически конструкция датчика, в котором ЧЭ подсоединен к автогенератору, изображена на рис. 3. Схема автогенератора содержит операционный усилитель AD-620, конденсаторы  $C$ ,  $C1$ ,  $C2$ , резистор  $R2$  и двухзатворный ЧЭ. Емкость  $C$  задает значение основной частоты генерации. Такая схема включения совместно с  $C1$ ,  $C2$  и емкостями двухзатворной полевой системы позволяет варьи-

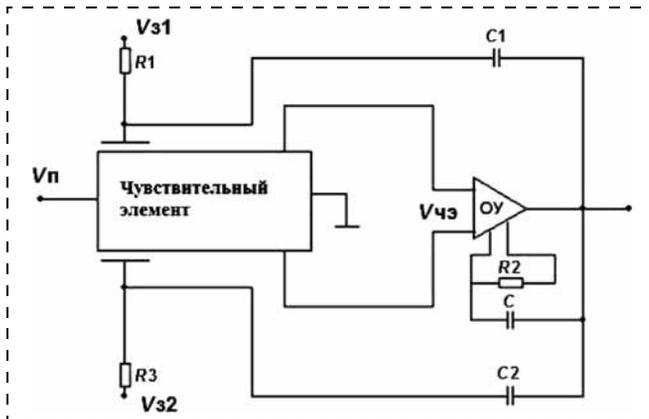


Рис. 3. Схема датчика с частотным выходом и использованием автогенератора

ровать основную частоту автогенератора в отсутствии внешних воздействий. Для измерений частоты применяли частотомер типа ЧЗ-63 с точностью измерений до 1 Гц. На рис. 3 приведены следующие обозначения:  $V_{п}$  — напряжение питания;  $V_{чэ}$  — сигнал с измерительных контактов ЧЭ;  $V_{з1}$ ,  $V_{з2}$  — напряжение на верхнем и нижнем затворе ЧЭ, соответственно; ОУ — операционный усилитель.

Прежде всего, были проведены исследования возможности регулирования основной частоты автогенератора (т. е. частоты в отсутствие внешних воздействий на ЧЭ) за счет вариаций напряжения питания и потенциалов на затворах ЧЭ, приводящих к изменению концентрации электронов в областях объемного заряда у границ раздела Si — SiO<sub>2</sub> и связанных с этим емкостей областей пространственного заряда в Si. В табл. 1 представлены данные о зависимости основной частоты автогенерации датчика от значения напряжения питания ЧЭ. Соответствующие зависимости измерены при напряжении на верхнем затворе 8 В и напряжении на нижнем затворе, равном 6, 10 В. Из табл. 1 видно, что частота автогенерации зависит от соотношения напряжения питания и напряжений, поданных на затворы ЧЭ.

Типичные экспериментальные зависимости основной частоты автогенерации датчика от напряжения, подаваемого на верхний затвор ЧЭ при постоянных напряжениях питания и на нижнем затворе, приведены на рис. 4. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют различному значению напряжения, поданного на нижний затвор ЧЭ. При изучении влияния изменений потенциала нижнего затвора на частоту автогенерации при постоянном потенциале на верхнем

Таблица 1

Зависимость основной частоты автогенерации датчика от напряжения питания ЧЭ

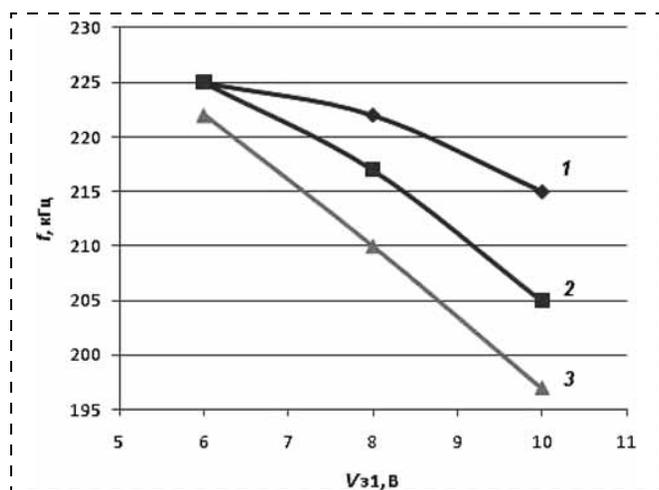
$V_{п}$ , В	$V_{з1}$ , В	$V_{з2}$ , В	$f$ , кГц
6	8	6	207,315
8	8	6	225,431
10	8	6	229,003
6	8	10	189,576
8	8	10	203,017
10	8	10	223,781

**Зависимость изменения частоты автогенерации и чувствительности датчика от температуры при различных значениях напряжения питания и потенциалов на затворах ЧЭ**

$V_{п}, В$	$V_{31}=V_{32}, В$	$\Delta T, ^\circ C$	$\Delta f, Гц$	$S, Гц/^\circ C$
8	10	25	150	6
10	8	25	450	18

**Влияние облучения на частоту автогенерации и чувствительность датчика**

ЧЭ	$V_{п}, В$	$V_{31}, В$	$V_{32}, В$	$f, кГц$	$S, Гц/рад$
Исходный	10	15	15	28,132	—
Облученный	10	15	15	20,225	263
Исходный	10	20	20	21,389	—
Облученный	10	20	20	20,736	28



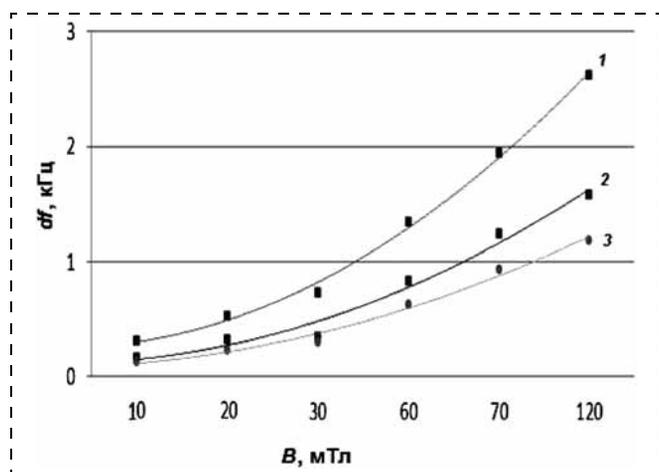
**Рис. 4.** Экспериментальные зависимости основной частоты автогенерации датчика от значения напряжения, поданного на верхний затвор ЧЭ.  $V_{п} = 8 В$ . На нижний затвор ЧЭ подавались следующие значения напряжения:

кривая 1 — 6 В, кривая 2 — 8 В, кривая 3 — 10 В

затворе ЧЭ, получены качественно аналогичные результаты (рис. 4). Таким образом, используемый в работе ЧЭ позволяет управлять основной частотой автогенератора, не прибегая к замене емкостей  $C, C1, C2$ , имеющихся в схеме (см. рис. 3) [6—7].

Зависимость изменения частоты автогенерации датчика от напряженности внешнего магнитного поля представлена на рис. 5. Источниками магнитного поля служили калиброванные постоянные магниты, позволяющие варьировать индукцию магнитного поля в диапазоне от 10 до 120 мТл. Из графика видно, что с ростом напряженности магнитного поля увеличивается изменение частоты автогенерации прибора, причем изменения частоты зависят также от потенциала на управляющих затворах.

Для изучения влияния температуры на выходные характеристики датчика ЧЭ был подвергнут температурному воздействию в диапазоне температур 20...55 °С. В табл. 2 приведены эксперименталь-



**Рис. 5.** Зависимость изменения частоты автогенерации датчика с частотным выходом от напряженности внешнего магнитного поля (измерены при  $V_{п} = 8 В$ , напряжении на верхнем затворе ЧЭ, равном 8 В и напряжении на нижнем затворе ЧЭ, равном 6 В — кривая 1, 8 В — кривая 2, 10 В — кривая 3)

ные значения изменения частоты ( $\Delta f$ ) при воздействии температуры, а также оценена чувствительность системы  $S$  при различных значениях напряжения питания и потенциалов, поданных на затворы ЧЭ.

Из табл. 2 видно, что во втором режиме значение чувствительности датчика в 3 раза выше, чем в первом. Таким образом, варьирование напряжения питания и потенциалов, поданных на затворы ЧЭ, позволяет изменять чувствительность датчика. Стоит отметить, что меньшая чувствительность соответствует линейной области ВАХ ЧЭ (см. рис. 2, участок А), а большая — участку насыщения ВАХ ЧЭ (см. рис. 2, участок В).

Для изучения влияния радиационного излучения на выходные частотные характеристики ЧЭ подвергся воздействию  $\gamma$ -квантов изотопа  $^{60}Co$ . Доза облучения составляла 30 крад. В процессе облучения напряжение на контактах питания и затворов ЧЭ отсутствовало. В табл. 3 приведены сравнительные данные о выходной частоте датчика при различных напряжениях питания и потенциалах затворов ЧЭ до и после облучения  $\gamma$ -квантами. Видно, что облучение изменяет выходную частоту датчика. Это объясняется тем, что облучение ЧЭ сопровождается накоплением положительного заряда в подзатворных пленках  $SiO_2$  и генерацией заряженных поверхностных состояний на границах раздела  $Si-SiO_2$  [8]. Благодаря этому изменяются емкости областей пространственного заряда в кремнии у границ раздела с диэлектриками и ток канала, а соответственно, и частота автогенератора. Понятно, что влияние дополнительного радиационного заряда будет тем больше, чем меньше положительный потенциал, поданный на затворы ЧЭ в процессе измерений, что также подтверждается данными табл. 3. Видно, что при повышении потенциалов, поданных на затворы ЧЭ на 5 В, чувствительность датчика к облучению падает на порядок.

#### Датчик с частотным выходом без использования отдельного автогенератора

Для построения датчика по такой схеме ЧЭ включается так, что напряжение питания и потенциалы на затворах соответствуют участкам С и D ВАХ (см. рис. 2). Это обуславливает возникновение осцилляций тока в канале ЧЭ благодаря ударной ионизации

и лавинному умножению носителей тока в канале. Общая схема устройства подобна показанной на рис. 3, но емкость  $C$ , ответственная за формирование цепи положительной обратной связи, вызывающей возникновение автогенерации в схеме на рис. 3, в данном случае отсутствует. Подключение усилителя к измерительным контактам ЧЭ и подключение емкостей  $C1$  и  $C2$  к затворам ЧЭ создают положительную обратную связь, необходимую для поддержания периодических колебаний в системе ЧЭ с усилителем. Таким образом, сам кристалл ЧЭ в данном случае представляет собой автогенератор, работающий в области ударной ионизации, при этом сохраняется чувствительность выходной частоты сигнала к внешним воздействиям. В условиях эксперимента частоты автогенерации такого устройства лежали в пределах 1...150 кГц в зависимости от значений напряжения питания и потенциалов, поданных на затворы ЧЭ.

Для оценки влияния магнитного поля на выходные характеристики в схеме включения ЧЭ без отдельного автогенератора использовали источник постоянного магнитного поля со значением магнитной индукции  $B = 50$  мТл. Эксперименты показали, что при определенных соотношениях напряжений питания и потенциала затворов чувствительность датчика к магнитному полю может быть очень высокой. Так, например, при напряжении питания, равном 34 В, а потенциалов на верхнем и нижнем затворах по 12 В достигается частота автогенерации около 100 кГц, при приложении источника магнитного поля, изменение частоты автогенерации  $\Delta f$  составляет 50—60 кГц, что соответствует чувствительности около 1...1,2 кГц/мТл. К сожалению, такие режимы весьма неустойчивы, поэтому одна из основных задач наших последующих исследований — схемотехнически повысить устойчивость сигнала в указанной области ВАХ.

На выходные характеристики ЧЭ, включенного без автогенератора, также оказывают влияние изменение температуры и облучение. Для примера,

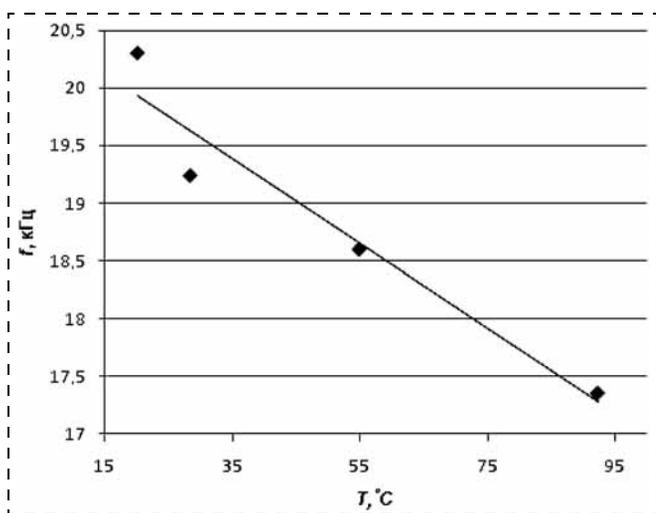


Рис. 6. Зависимость частоты автогенерации ЧЭ от температуры. Зависимость измерена при  $V_{\text{п}} = 34$  В, напряжении на верхнем затворе, равном 13 В, и напряжении на нижнем затворе, равном 12 В

на рис. 6 показана экспериментальная зависимость выходной частоты автогенерации ЧЭ, работающего в области развития токовой лавины, от изменения температуры. Экспериментальная зависимость наглядно подтверждает способность двухзатворного ЧЭ выступать в качестве датчика температурного воздействия с частотным выходом без использования дополнительного автогенератора. Значение температурной чувствительности такого прибора в условиях эксперимента составляет 37 Гц/°С.

## Заключение

Представленные выше результаты показывают способность полевого МДПДМ-транзистора со встроенным каналом и двумя дополнительными контактами к боковым поверхностям канала выступать в роли ЧЭ преобразователей различных внешних воздействий, таких как магнитное поле, температура или радиация, в частотный выходной сигнал. При этом преобразователь может быть организован как по известным схемам автогенератором, так и по схеме, в которой используются собственные осцилляции тока ЧЭ на определенном участке его ВАХ. Дополнительным достоинством описанного ЧЭ является возможность управления значением выходной частоты автогенератора (т. е. частоты в отсутствие внешних воздействий) вариациями напряжения питания и потенциалов полевых затворов.

Результаты проведенных нами предварительных экспериментов показали, что существует возможность существенно повысить чувствительность рассматриваемого датчика ко всем изученным внешним воздействиям, а также использовать предложенный подход для создания датчиков с частотным выходом для других внешних воздействий, таких, например, как давление и свет ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного диапазона.

## Список литературы

1. Негоденко О. Н., Мардамшин Ю. П. Микроэлектронные датчики с частотным выходом на основе аналогов негетронов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2000. № 5—6. С. 19—22.
2. Касимов Ф. Д. Микроэлектронная негетроника — новые направления функциональной электроники // Микросистемная техника. 2003. № 4. С. 6—9.
3. Касимов Ф. Д. Перспективы развития и применения микроэлектронной негетроники // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2003. № 5. С. 5—8.
4. Бабичев Г. Г., Гаврилюк Г. И., Зинченко Э. А. и др. Преобразователь давления с частотным выходом на основе однопереходных транзисторов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2004. № 3. С. 48—51.
5. Бараночников М. Л., Леонов А. В., Мальцев П. П. и др. Полевой датчик Холла на основе структур "кремний-на-изоляторе" // Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам / Под ред. П. П. Мальцева. М.: Техносфера, 2005. С. 436—444.
6. Магниточувствительная интегральная схема: пат. РФ 2465629.
7. Бараночников М. Л., Леонов А. В., Мордкович В. Н. и др. Особенности магниточувствительных сенсоров на основе полевого датчика Холла // Приборы и техника экспериментов. 2012. № 6. С. 1—8.
8. Першенков В. С., Попов В. Д., Шальнов Г. М. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем. М.: Энергоатомиздат, 1988. 256 с.

**О. А. Рубан**, инж.-исследователь,  
**С. С. Пушкарев**, инж.-исследователь,  
**Г. Б. Галиев**, д-р физ.-мат. наук, зав. лаб.,  
**Е. А. Климов**, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,  
**Д. С. Пономарев**, канд. физ.-мат. наук,  
 ст. науч. сотр.,  
**Р. А. Хабибуллин**, канд. физ.-мат. наук,  
 мл. науч. сотр.,  
**П. П. Мальцев**, д-р техн. наук, проф., директор,  
 Федеральное государственное бюджетное  
 учреждение науки Институт  
 сверхвысокочастотной полупроводниковой  
 электроники Российской академии наук  
 (ИСВЧПЭ РАН), г. Москва,  
 e-mail: myx.05@mail.ru

## МЕТАМОРФНЫЕ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРЫ InGaAs/InAlAs НА ПОДЛОЖКАХ GaAs ДЛЯ ПРИБОРОВ ТЕРАГЕРЦОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

*Поступила в редакцию 07.03.2013*

*Исследованы электрофизические и структурные свойства метаморфных наногетероструктур InGaAs/InAlAs/GaAs с различным дизайном метаморфного буфера. Установлено, что его использование с введенными внутрь 30-периодными сверхрешетками (СР) InGaAs/InAlAs позволяет увеличить подвижность электронов на 36 % в активном слое гетероструктуры по сравнению с образцом без СР и при этом сохранить высокое структурное качество. Для оценки структурного качества исследуемых образцов определены средние квадратичные значения шероховатости поверхности RMS с помощью измерений атомно-силовой микроскопии.*

**Ключевые слова:** терагерцовое излучение, метаморфный буфер, наногетероструктуры, молекулярно-лучевая эпитаксия

### Введение

Приборы, действующие в терагерцовом диапазоне, имеют важное практическое применение в системах безопасности, медицинской диагностике и терапии для анализа газов, а также для формирования изображений и биоимиджинга [1, 2]. Системы с использованием терагерцового излучения также активно работают в радиолокации, спутниковом телевидении, многоканальных системах беспроводной связи, в том числе — спутниковой и специальной.

Спектр практически реализуемых подходов для генерации терагерцового излучения достаточно широк: умножители частоты, нелинейно-оптические преобразователи, квантово-каскадные лазеры, диоды Ганна, фотопроводящие антенны, а также полевые транзисторы с затвором Шоттки. Последние показывают наибольшую частоту генерации среди

всех перечисленных, а принцип их действия основан на осцилляциях двумерной плазмы (плазменных колебаниях) в канале транзистора InGaAs [3].

Как видно из выражения для частоты усиления по току  $f_T$

$$f_T \approx \frac{v_{dr}}{2\pi L_g}, \quad (1)$$

для увеличения частоты работы прибора в электронике необходимо увеличить дрейфовую скорость носителей  $v_{dr}$  и уменьшать длину затвора транзистора  $L_g$ . Длина затвора зависит от выбранной топологии, к тому же на сегодняшний день достигнуто предельное значение  $L_g \approx 25$  нм для FET (*field effect transistor*) на подложке GaAs [4]. Дрейфовую скорость можно повысить за счет увеличения содержания индия  $x$  в канале  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . Для того чтобы создать такие структуры с высоким  $x$  используют метаморфные InGaAs/InAlAs/GaAs МНЕМТ (*metamorphic high electron mobility transistor*) наногетероструктуры. Основная идея МНЕМТ-структуры заключается в выращивании между подложкой и активными слоями относительно толстого (0,5...1,5 мкм) метаморфного буфера (ММБ) с изменяющимся с толщиной химическим составом. За счет образования сетки дислокаций несоответствия [5, 6] в слое ММБ происходит релаксация напряжений, возникающих вследствие рассогласования решеток. При этом практически все дислокации оказываются внутри и не прорастают в активные слои.

Цель настоящей работы — исследование влияния различной конструкции ММБ на электрофизические и структурные характеристики InGaAs/InAlAs/GaAs МНЕМТ-наногетероструктур с высоким содержанием InAs (~0,7) в канале.

### Структурные свойства исследуемых образцов

Исследуемые образцы МНЕМТ-гетероструктур были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке ЦНА-24 в ИСВЧПЭ РАН на подложках GaAs с ориентацией (100). В качестве базового образца была выбрана гетероструктура с ММБ с плавным линейным изменением мольной доли  $x(\text{InAs})$  от 0,05...0,75 (образец № 1). Как правило, такая структура содержит сильно напряженный ММБ, что может привести к проникновению прорастающих дислокаций в активную область гетероструктуры [7, 8]. Поэтому для сравнительного анализа нами были выращены две дополнительные гетероструктуры, отличающиеся составом ММБ.

В образце № 2 в линейный ММБ были введены две 30-периодные сверхрешетки (СР) InAlAs/InGaAs, предназначенные для равномерного распределения механических напряжений, возникающих в ММБ. СР являются симметрично рассогласованными относительно состава ММБ при данном  $x$ , что может приводить к образованию короткопери-

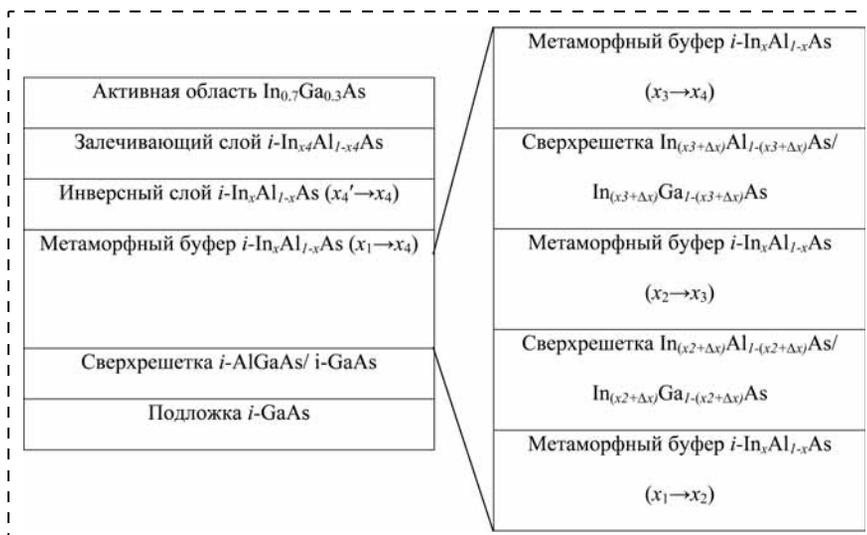


Рис. 1. Схема эпитаксиальных слоев образца № 2

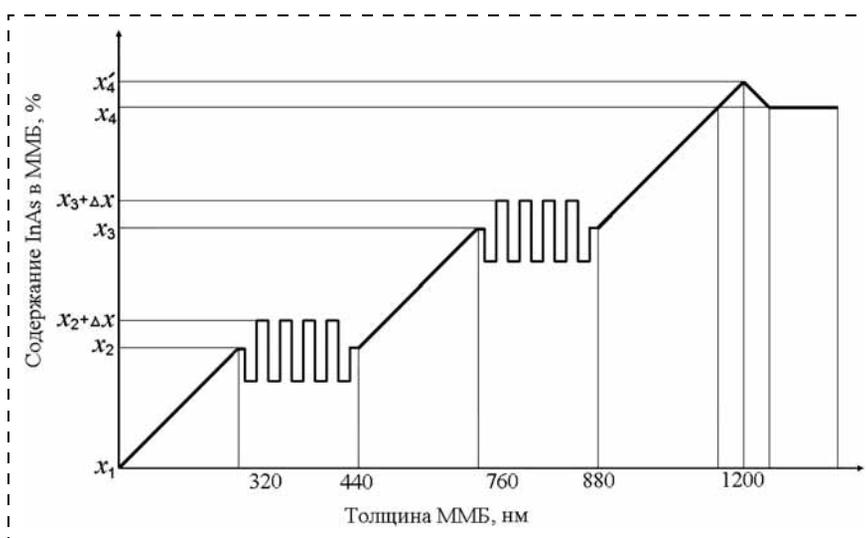


Рис. 2. Распределение состава ММБ  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  по толщине для образца № 2

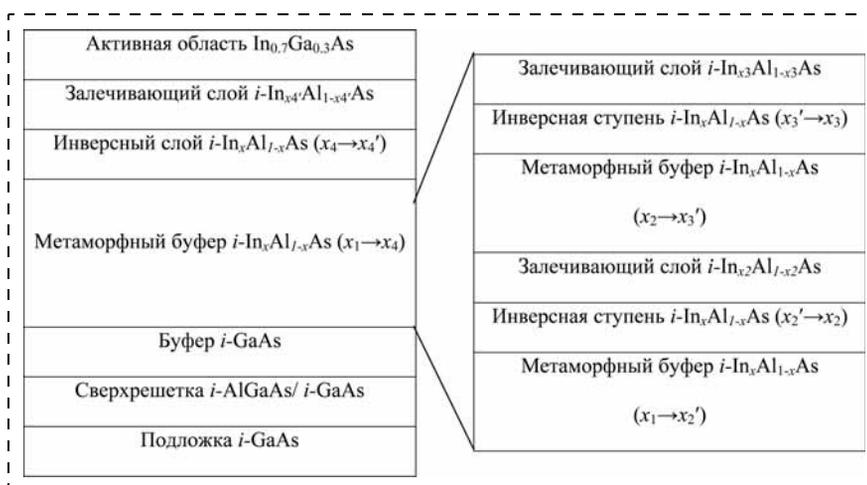


Рис. 3. Схема эпитаксиальных слоев образца № 3

одных полей упругой деформации. Они, в свою очередь, приводят к изгибанию прорастающих дислокаций, а также препятствуют фазовому расслоению слоя  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ . На рис. 1 приведена схема эпитаксиальных слоев образца № 2. Профиль содержания  $x$  в ММБ для образца № 2 представлен на рис. 2.

В целях предотвращения образования областей с пониженным потенциалом и появления параллельной проводимости слой  $\text{InGaAs}$  в СР  $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$  выращивали с пониженным содержанием  $\text{InAs}$  относительно текущего состава ММБ, а слой  $\text{InAlAs}$  — с повышенным содержанием.

Образец № 3 имел схожую структуру с образцом № 2, однако в ММБ были введены две инверсные ступени  $\text{InAlAs}$  вместо СР. Инверсные ступени (ИС) должны существенно уменьшить или полностью ликвидировать оставшиеся в ММБ напряжения. В результате получим ненапряженную подложку для роста последующих слоев. Перепад содержания  $\text{InAs}$  в инверсных ступенях составил 0,05. Схема эпитаксиальных слоев и профиль содержания  $x$  в ММБ для образца № 3 приведены на рис. 3 и 4, соответственно.

Во всех образцах после ММБ был выращен инверсный слой  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  и залечивающий слой  $\text{In}_{0,70}\text{Al}_{0,30}\text{As}$  для уменьшения количества дислокаций, проросших через ММБ.

## Результаты и их обсуждение

Электрофизические параметры образцов: холловские подвижность  $\mu_H$  и концентрация двумерного электронного газа  $n_H$  измеряли с помощью эффекта Холла при температурах 300 и 77 К методом Ван дер Пау. Результаты измерения представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что при введении в ММБ комбинации двух СР холловская концентрация изменяется незначительно, в то время как  $\mu_H$  возрастает на ~36 % при комнатной температуре по сравнению с образцом № 1 без СР. Такое поведение подвижности связано с

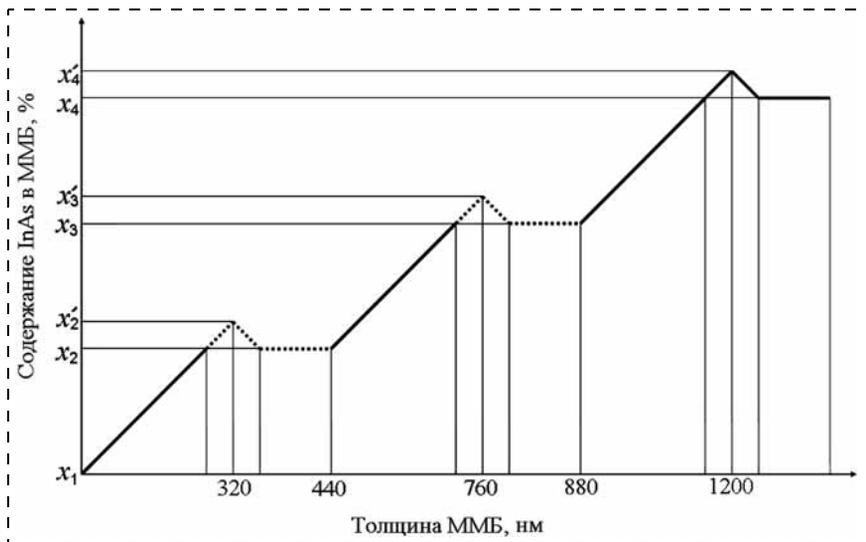


Рис. 4. Распределение состава ММБ  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  по толщине для образца № 3

более плавным распределением упругих напряжений, возникающих в ММБ в случае использования СР, что также подтверждается на снимках атомно-силовой микроскопии (АСМ). При этом использование двух инверсных ступеней приводит к незначительному увеличению  $\mu_{\text{H}}$ , несмотря на аккомодацию механического напряжения в ММБ за счет введения слоя  $\text{InAlAs}$  с уменьшенным параметром кристаллической решетки.

На рис. 5 приведены снимки АСМ, соответствующие образцам № 2 и 3. По данным АСМ были смоделированы 3D-изображения рельефа поверхности образцов № 2 и 3, представленные на рис. 6.

Таблица 1

Результаты измерений эффекта Холла: значения холловских подвижности  $\mu_{\text{H}}$  и концентрации  $n_{\text{H}}$  двумерного электронного газа

№ образца	$\mu_{\text{H}}, \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{c})$		$n_{\text{H}}, 10^{12} \text{cm}^{-2}$	
	300 К	77 К	300 К	77 К
1(ММБ)	7000	15 500	1,50	1,40
2(ММБ + 2 СР)	11 000	37 500	1,40	1,30
3(ММБ + 2 ИС)	9000	23 000	1,80	1,70

Таблица 2

Значение средней квадратичной шероховатости поверхности RMS для образцов № 2 и 3

№ образца	Направление [0 1 1], нм	Направление [0 -1 1], нм
2(ММБ + 2 СР)	9,9	10,2
3(ММБ + 2 ИС)	10,3	12,4

Видно, что на поверхности обоих образцов присутствует анизотропный поперечно-полосатый рельеф (*cross-hatch*). Более ярко выраженные полосы с большей высотой соответствуют кристаллографическому направлению [0 1 1], в то время как вдоль направления [0 -1 1] полосы проявляются слабее. Это свидетельствует о наличии релаксаций, произошедших в ММБ. Неодинаковость рельефа по двум направлениям можно связать с тем, что образуются дислокации несоответствия двух типов ( $\alpha$  и  $\beta$ , зарождающихся на атомах V и III группы соответственно): дислокации типа  $\alpha$  прорастают в направлении  $[-1 \ 1 \ 0]$  и дислокации типа  $\beta$  — в направлении  $[1 \ 1 \ 0]$ .

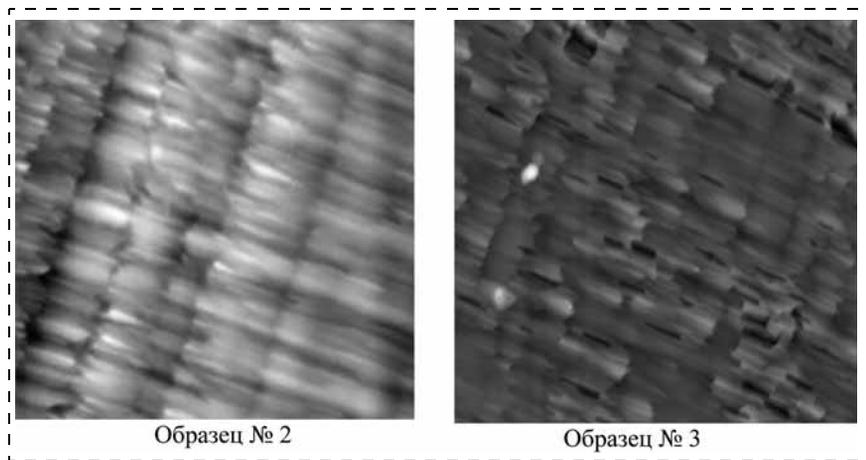


Рис. 5. АСМ-изображения образцов с полем  $13 \times 13$  мкм

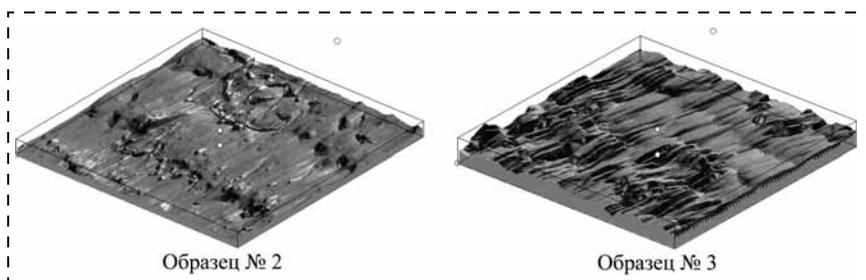


Рис. 6. 3D-моделирование рельефа поверхности по-АСМ изображениям

Среднее квадратичное значение шероховатости RMS (*root-mean-square*) образцов № 2 и 3 приведено в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что RMS по разным направлениям отличается, что свидетельствует об анизотропном рельефе поверхности. Кроме того, значения шероховатости поверхности хорошо коррелируют с электрофизическими характеристиками (см. табл. 1). В частности, образец № 3 демонстрирует более высокое значение RMS, что

свидетельствует об ухудшении его кристаллического качества по сравнению с образцом № 2. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению подвижности в образце № 3 за счет рассеяния электронов в активном слое гетероструктуры на прорастающих дислокациях из ММБ.

## Заключение

В работе были исследованы электрофизические и структурные свойства метаморфных наногетероструктур InGaAs/InAlAs/GaAs с различным дизайном ММБ. Было установлено, что использование ММБ с линейным законом изменения мольной доли InAs от 0,05 до 0,75 с введенными внутрь ММБ 30-периодными сверхрешетками InGaAs/InAlAs позволяет увеличить подвижность электронов на 36 % при  $T = 300$  К в активном слое InGaAs по сравнению с базовым образцом без СР и при этом сохранить высокое структурное качество. Показано, что введение внутрь ММБ двух инверсных ступеней InAlAs вместо сверхрешеток приводит к меньшему увеличению подвижности электронов (на 20 % по сравнению с базовым образцом), что связано с ростом дефектности структуры.

На основе разработанное МНЕМТ-гетероструктуры был изготовлен полевой транзистор с предельными частотами усиления по току и по мощности  $f_T = 0,013$  ТГц и  $f_{max} = 0,63$  ТГц.

*Данная работа была выполнена в рамках федеральной целевой программы "Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники" на 2008—2015 годы*

(мероприятие 68 и 132) — I очередь, по Государственному контракту № 16.426.11.0051 от 28 апреля 2012 г.

## Список литературы

1. Sizov F. THz radiation sensors // Opto-Electronics Review. 2010. Vol. 18. № 1. P. 10.
2. Sizov F., Rogalsky A. THz detectors // Progress in Quantum Electronics. 2010. Vol. 34. P. 278.
3. Millithaler J. F., Varani L., Palermo C., Mateos J., González T., Perez S., Pardo D., Knap W., Lusakowski J., Dyakonova N., Bollaert S., Cappy A. TeraHertz emission from nanometric HEMTs analyzed by noise spectra // Noise and Fluctuations: Proc. of 18th International Conference on Noise and Fluctuations-ICNF. 2005. P. 335.
4. Бугаев А. С., Галиев Г. Б., Мальцев П. П., Пушкарёв С. С., Фёдоров Ю. В. Полупроводниковые гетероструктуры InAlAs/InGaAs с метаморфным буфером  $\text{In}_x(\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y})_{1-x}\text{As}$ : конструкция, технология, применение // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 10. С. 14—24.
5. Kim D.-H., del Alamo J. A. 30-nm InAs PHEMTs With  $f_T = 644$  GHz and  $f_{max} = 681$  GHz // IEEE Electron Device Letters. August 2010. Vol. 31, № 8. P. 806.
6. Kim D.-H., del Alamo J. A. Scalability of Sub-100 nm InAs HEMTs on InP Substrate for Future Logic Applications // IEEE Transaction on Electron Devices. August 2010. Vol. 57, № 7. P. 1504.
7. Yastrubchak O., Wosinski T., Figielski T., Lusakowska E., Pecz B., Toth A. L. Misfit dislocations and surface morphology of lattice-mismatched GaAs/InGaAs heterostructures // Physica E. 2003. Vol. 17. P. 561.
8. Bollaert S., Cordier Y., Zaknune M., Happy H., Hoel V., Lepilliet S., Treron D., Cappy A. The indium content in metamorphic  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  HEMTs on GaAs substrate: a new structure parameter // Solid-State Electronics. 2000. Vol. 44. P. 1021.
9. Полупроводниковая метаморфная наногетероструктура InAlAs/InGaAs: патент РФ на полезную модель 111352 / Г. Б. Галиев, И. С. Васильевский, Е. А. Климов, С. С. Пушкарёв, О. А. Рубан; патентообладатель ИСВЧПЭ РАН. — № 2011125642/28; заявл. 23.06.2011; опубл. 10.12.2011, Бюл. № 34.

УДК 539.234

А. А. Троицкий, аспирант,

e-mail: andrei.troitskiy@gmail.com,

В. М. Березин, д-р физ.-мат. наук, проф.,

e-mail: bvm@susu.ac.ru,

В. С. Лукашев, инженер-электроник,

ФГБОУ ВПО "Южно-Уральский государственный университет" (национальный исследовательский университет), г. Челябинск

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК, ОСАЖДАЕМЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫМ МЕТОДОМ

Поступила в редакцию 25.03.2013

*Методом распыления электронным лучом в вакууме были получены тонкие углеродные пленки (толщиной до 30 нм) на нагретой стеклянной подложке. Было измерено удельное поверхностное сопротивление пленок и их коэффициент пропускания (при  $\lambda = 560$  нм), найдены зависимости от толщины пленки. Проведен анализ результатов и сравнение с другими работами.*

**Ключевые слова:** графен, углерод, электронно-лучевое распыление, углеродные пленки, тонкие пленки, прозрачность

## Введение

Большой интерес для нанoeлектроники представляет графен и графеноподобные структуры, которые многие исследователи рассматривают как материалы для современных быстродействующих транзисторов. Графен можно представить как одну плоскость графита, отделенную от объемного кристалла. Структурно он представляет собой двухмерную сетку из сот, образованных атомами углерода [1].

На сегодняшний день используются два основных химических метода получения графена. Первый метод — химическое осаждение углерода из газовой фазы (*chemical vapor deposition*, CVD), который позволяет получать графен высокого качества с заданным числом слоев в пленке (образце) и с высокой подвижностью носителей заряда. Тем не менее CVD-метод трудоемок (температура газа и подложек  $\sim 1000$  °С, вакуум порядка  $10^{-8}$  Тор и выше), а в ка-

честве подложек используют кристаллы с определенной кристаллической поверхностью [2]. Второй метод — получение графена химическим способом из раствора (*chemically derived graphene, CDG*). Пленки, полученные CDG-методом, имеют меньшую подвижность носителей, однако они находят применение в сенсорах [3], прозрачных проводниках [4], транзисторах [5] и т. д.

В данной работе предлагается еще один метод получения углеродных и графеноподобных пленок. Метод заключается в том, что углеродосодержащий источник (графитовая мишень) расплывается в вакууме сканирующим электронным лучом и осаждается на подложки. При этом обеспечивается контроль массопереноса и получения шести образцов с разной толщиной пленки в одинаковых условиях конденсации.

### Методика получения

Установка для напыления выполнена на основе вакуумной системы TORR International Inc с турбомолекулярным насосом и контроллером управления процессом. Распыление мишени происходило в вакууме порядка  $10^{-5}$ – $10^{-7}$  Тор. Монтажный столик, на который крепят подложки, можно нагревать до температуры 550 °С. Нагрев подложки осуществляется инфракрасными лампами. Мишень устанавливается в тигель, который охлаждается системой проточной воды. Поток распрыленного углерода имеет коническую форму и направлен на столик снизу вверх. Толщину получаемой углеродной пленки (УП) измеряли встроенным акустическим датчиком, скорость напыления рассчитывает контроллер. Регулирование скорости потока проводится изменением тока электронного луча в автоматическом режиме заданием номинальной скорости в контроллере. Схема процесса напыления представлена на рис. 1, а.

На монтажном столике размещается шесть держателей под равным углом друг к другу (рис. 1, б). Под каждый держатель ставится стеклянная подложка (25 × 25 мм, толщина 0,1 мм или 1 мм). Столик закрывается от потока распрыляемого вещества металлическим экраном с круглым отверстием (диаметр 10 мм), через которое проходит узкий поток распрыляемого материала. Переход от одного образца к другому осуществляется вручную поворотом монтажного столика, закрепленного на стержне герметичного ввода. Во время напыления образца столик не вращается.

Данная методика напыления позволяет получать идентичные образцы одинаковой формы. Преимуществами методики являются: общие пара-

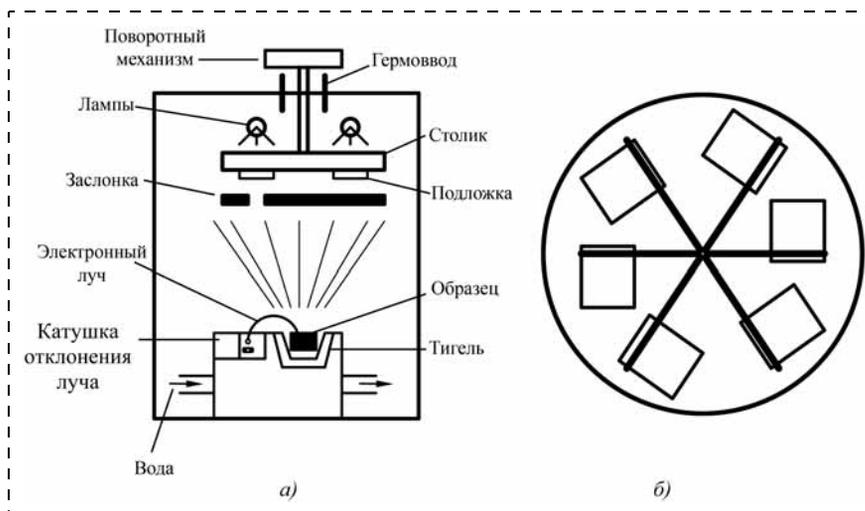


Рис. 1. Схема вакуумной камеры (а) и расположение подложек на монтажном столике (б)

метры среды (температура подложки, вакуум, время нагрева), экономия временных и материальных ресурсов (объема используемой мишени), а также возможность получения пленок различной толщины от одного источника и в одинаковых условиях.

### Характеристики углеродных пленок

За один цикл напыления получали серию углеродных пленок (УП) толщиной 5, 10, 15, 20, 25 и 30 нм. Серии образцов были получены при разной температуре подложки. Пленки были изучены под АФМ-микроскопом, было сделано предположение, что пленки имеют кристаллическую структуру [6]. На рис. 2 представлены графики зависимости поверхностного сопротивления от толщины формируемой пленки. Толщину УП измеряли акустическим датчиком толщины, поверхностное сопротивление — на цифровом измерителе удельного поверхностного сопротивления полупроводниковых материалов ИУС-3 четырехзондовым методом. Контактное устройство обеспечивает контактирование четырех зондов, расположенных на равных расстояниях друг от друга ( $1 \pm 0,015$  мм), с измеряемым образцом. Через два внешних контакта пропускается переменный ток 50 Гц, амплитуда которого зависит от выбранного диапазона (в пределах от 0,23 мкА

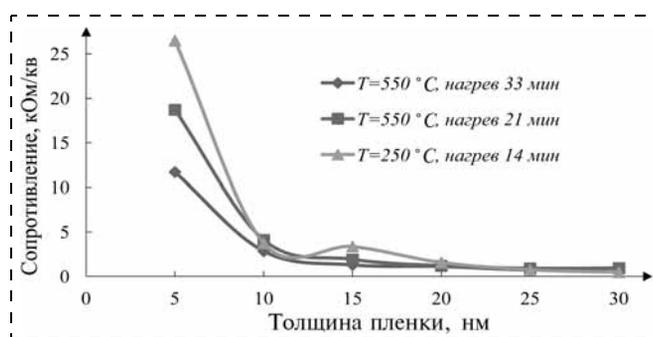


Рис. 2. Зависимости поверхностного сопротивления от толщины УП

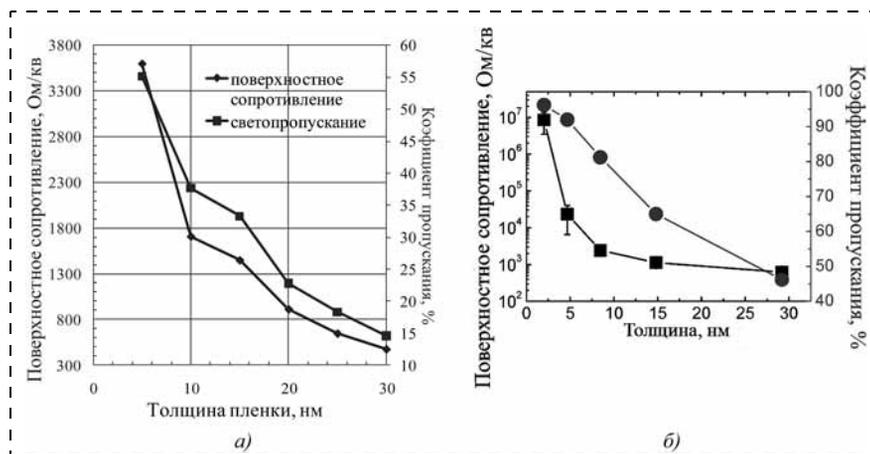


Рис. 3. Зависимость коэффициента пропускания и поверхностного сопротивления от толщины пленки:

*a* — данные авторов; *б* — данные из работы [2]

до 23 мА). Ток создает в образце распределение потенциала, определяемое расстоянием между контактами, током внешних контактов и удельным поверхностным сопротивлением образца. В приборе определяется отношение амплитуд напряжения, возникающего между внутренними контактами манипулятора, и тока внешних контактов.

Из графика на рис. 2 видно, что при различных режимах напыления сопротивление получаемых пленок одной толщины отличается. Это может быть связано, во-первых, с температурой подложки (в работе [7] эта зависимость доказана), из-за которой процесс формирования слоя изменяется. Во-вторых, возможен вклад погрешности датчика толщины, вызванной различной степенью осаждения напыляемого углерода на стекло и мембрану датчика.

Для пленок, полученных при температуре 250 °С (нагрев 14 мин), были измерены спектральные коэффициенты пропускания (фотометр КФК-3, длина волны 560 нм). На рис. 3, *a* представлен совмещенный график зависимости коэффициента пропускания и поверхностного сопротивления от толщины пленки. Из этого графика видно, что зависимости имеют симбатный ход, это указывает на

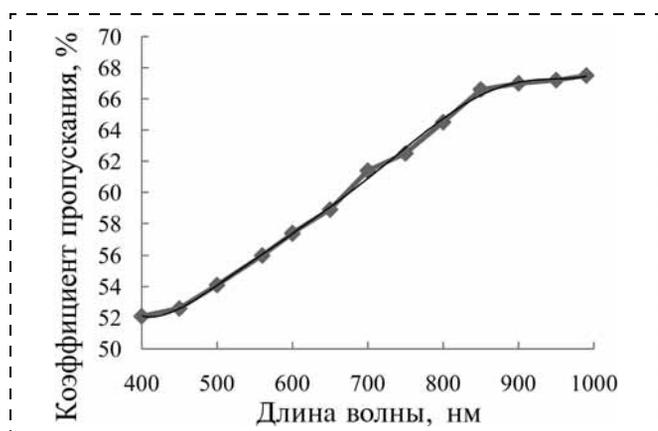


Рис. 4. Зависимость коэффициента пропускания от длины волны проходящего света

основной вклад  $\pi$ -электронов проводимости в прозрачность УП. Расхождение поверхностного сопротивления и коэффициента пропускания по нашим результатам и по данным работы [2] свидетельствует о влиянии метода формирования УП на их свойства (рис. 3, *б*).

В работе [2] толщину пленок регулировали с помощью различных методов травления: погружением в гидразин, выдержкой в парах гидразина, электрохимическим восстановлением, термическим отжигом или комбинацией нескольких методик. Сравняя графики, можно отметить, что ход обеих зависимостей совпадает, однако абсолютные значения величин различаются.

В нашем эксперименте получаемые пленки были менее прозрачны, поверхностное сопротивление оказалось ниже, чем в работе [2]. Например, самая толстая пленка 30 нм, полученная в нашем эксперименте, пропускает всего 14,6 % света, в то время как CDG-пленка пропускает примерно 46 %.

На рис. 4 приведена зависимость коэффициента пропускания пленки толщиной 5 нм от длины волны проходящего света. Для других пленок ход зависимости аналогичен. В работе [8] представлены зависимости для однослойного и двухслойного графена, которые аналогичны полученным.

Коэффициент пропускания графеновых структур напрямую зависит от числа графеновых слоев. Один слой графена пропускает ~97,7 % света [9]. Теоретическая зависимость коэффициента пропускания выражается формулой

$$T_n = (1 - \pi\alpha)^n, \quad (1)$$

где  $n$  — число слоев;  $\alpha$  — постоянная тонкой структуры (равная 0,0073),  $(1 - \pi\alpha)$  — прозрачность одного слоя [8]. График зависимости пропускания от числа слоев представлен на рис. 5.

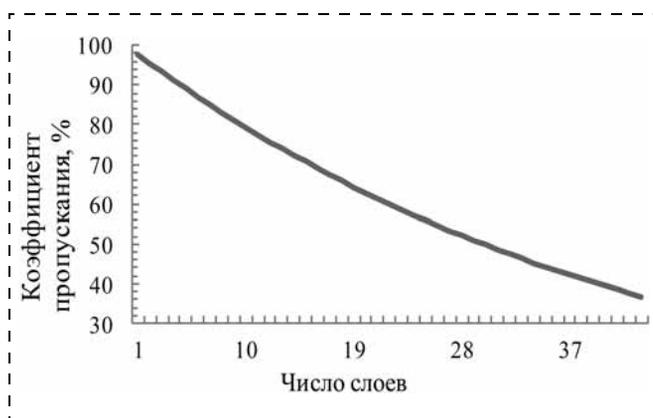


Рис. 5. Теоретическая зависимость коэффициента пропускания от числа графеновых слоев

Таблица 1

## Сравнение теоретических и экспериментальных значений толщины УП (толщина стекла 0,1 мм)

Образец	Поверхностное сопротивление, Ом/кв	Коэффициент пропускания, %	Число слоев	Заданная толщина, нм	Расчетная толщина, нм
1	2170	45,0	34	5	11,22
2	1900	42,9	36	10	11,88
3	1110	32,2	49	15	16,17
4	792	25,0	59	20	19,47
5	608	18,5	72	25	23,76
6	369	12,1	91	30	30,03

Таблица 2

## Сравнение теоретических и экспериментальных значений толщины УП (толщина стекла 0,1 мм)

Образец	Поверхностное сопротивление, Ом/кв	Коэффициент пропускания, %	Число слоев	Заданная толщина, нм	Расчетная толщина, нм
1	3600	55,2	25	5	8,5
2	1710	37,7	42	10	14,28
3	1450	33,3	47	15	15,98
4	914	22,8	64	20	21,76
5	648	18,3	73	25	24,82
6	476	14,6	83	30	28,22

Таблица 3

## Сравнение теоретических и экспериментальных значений толщины УП для пленок до 8 нм

Образец	Поверхностное сопротивление, Ом/кв	Коэффициент пропускания, %	Число слоев	Заданная толщина, нм	Расчетная толщина, нм
1	—	86,2	6	1,65	2,04
2	1650	79,1	10	3,3	3,4
3	510	64,0	19	4,95	6,46
4	296	55,6	25	7,26	8,5

Толщина слоя графена равна 0,34 нм, что соответствует расстоянию между двумя плоскостями графита или толщине однослойной углеродной нанотрубки [10]. Принимая идеализированную модель УП в виде многослойного графена по толщине пленки можно рассчитать экспериментальное число слоев в получаемых пленках. Зная коэффициент пропускания, можно определить теоретическое число слоев.

Ниже приведены таблицы экспериментальных и теоретических значений величин для пленок, полученных на стеклянных подложках толщиной 0,1 и 1 мм, а также для пленок толщиной до 8 нм. Полученный коэффициент пропускания для образцов позволяет вычислить число слоев [по формуле (1)], а также получить расчетную толщину слоя [10].

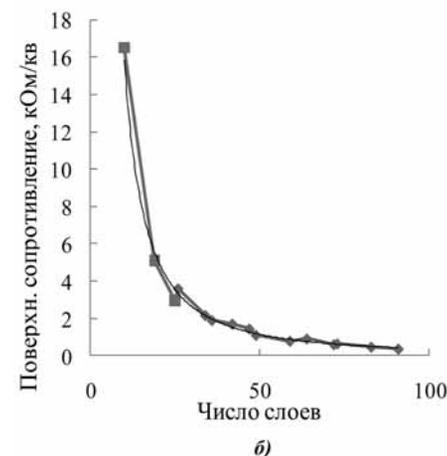
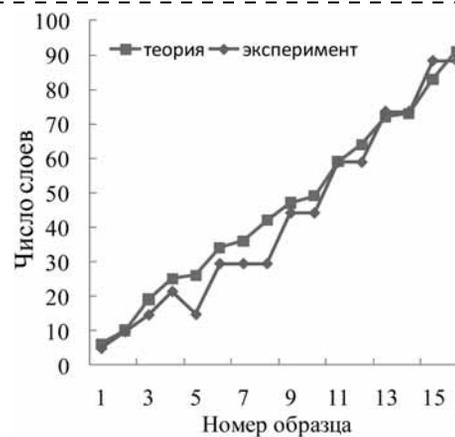


Рис. 6. Зависимости теоретических значений числа слоев в УП: а — сравнение теоретических и экспериментальных значений числа слоев; б — зависимость поверхностного сопротивления от числа слоев

Результаты такого сравнения (табл. 1–3) показывают, что вычисленная экспериментальная и теоретическая (модельная) толщина совпадают. Для наглядности на рис. 6, а сравниваются теоретические и экспериментальные значения числа слоев для всех образцов. Максимальное отклонение от теории наблюдается для образца 1 (табл. 1) и образца 2 (табл. 2). Это может быть объяснено неравномерностью потока распыляемого вещества. Ниже приведен совмещенный график зависимости поверхностного сопротивления от теоретического значения числа слоев для 16 образцов (рис. 6, б). Из графика видно, что критическое значение толщины равно ~25 слоев, что соответствует ~7 нм. Для пленок толщиной меньше критической наблюдается резкое возрастание электрического сопротивления, что возможно обусловлено появлением запрещенной зоны в спектре электронов проводимости как, например, в графеновых нанолентах [11]. В настоящее время ведутся дополнительные исследования по данному вопросу.

## Выводы

В работе получены образцы тонких пленок углерода методом распыления пиролитического графита сканирующим электронным лучом. Предложена методика получения серий образцов разной толщины в максимально идентичных условиях конденсации, что позволяет экспериментально исследовать зависимость пленок от их толщины.

Экспериментально исследованы зависимости поверхностного сопротивления и коэффициента пропускания от толщины полученных пленок. Наблюдается резкий рост сопротивления, который может быть связан с образованием запрещенной зоны в спектре электронов проводимости.

Полученные зависимости светопропускания от толщины соответствуют теоретическим зависимостям для идеализированной модели пленки в виде стопки графеновых слоев, ориентированных в плоскости подложки.

### Список литературы

1. Geim A. K., Novoselov K. S. The rise of graphene // Nature Mater. 2007. Vol. 6. P. 183–191.
2. Yamaguchi H., Eda G., Mattevi C., Kim H. K., Chhowalla M. Highly Uniform 300 mm Wafer-Scale Deposition of Single and

Multilayered Chemically Derived Graphene Thin Films // ACS Nano. 2010. Vol. 4. P. 524–528.

3. Robison J. T., Perkins F. K., Snow E. S., Wei Z., Sheehan P. E. Reduced Graphene Oxide Molecular Sensors // Nano Lett. 2008. Vol. 8. P. 3137–3140.

4. Watcharotone S., Dikin D. A., Stankovich S., Piner R., Jung I., Dommett G. H. B., Evmenenko G., Wu S.-E., Chen S.-F., Liu C.-P. et al. Graphene-Silica Composite Thin Films as Transparent Conductors // Nano Lett. 2007. Vol. 7. P. 1888–1892.

5. Eda G., Chhowalla M. Graphene-Based Composite Thin Films for Electronics // Nano Lett. 2009. Vol. 9. P. 814–818.

6. Троицкий А. А., Березин В. М., Лукашев В. С. Структура и свойства углеродных пленок, получаемых электронно-лучевым распылением в вакууме // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. 2012. № 34. С. 130–137.

7. Васильев В. А., Чернов П. С. Диффузионная модель роста и морфология поверхностей тонких пленок материалов // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 11. С. 11–16.

8. Lee S., Lee K., Liu C. H., Zhong Z. Homogeneous bilayer graphene film based flexible transparent conductors // Nanoscale. 2012. Vol. 4. P. 639–644.

9. Nair R. R., Blake P., Grigorenko A. N., Novoselov K. S., Booth T. J., Stauber T., Peres N. M. R., Geim A. K. Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene // Science. 2008. Vol. 320. P. 1308.

10. Huang Y., Wu J., Hwang K. C. Thickness of graphene and single-wall carbon nanotubes // Physical Review B. 2006. Vol. 74. P. 245413.

11. Han M. Y., Ozyilmaz B., Zhang Y., Kim P. Energy Band-Gap Engineering of Graphene Nanoribbons // Physical Review Letters. 2007. Vol. 98. P. 206805.

УДК 621/383

А. А. Пустовалов, канд. техн. наук, член.-корр. РАЕН, зав. лаб.,  
Институт динамики геосфер РАН, г. Москва,  
e-mail: apribor@idg.chph.ras.ru,  
Л. А. Цветков, сотрудник,  
ООО "БИАПОС", г. Москва

## ПРОИЗВОДСТВО РАДИОНУКЛИДА НИКЕЛЯ-63 ВЫСОКОГО ОБОГАЩЕНИЯ — ГЛАВНОЕ УСЛОВИЕ СОЗДАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ БЕТА-ВОЛЬТАИЧЕСКИХ АТОМНЫХ БАТАРЕЙ

Поступила в редакцию 20.02.2013

Рассмотрены и обоснованы существующие возможности получения в промышленном масштабе высокообогащенного (80–85 %) радионуклида никеля-63 с использованием реальных технологий действующих предприятий отечественной промышленности.

Никель-63 — искусственный радионуклид, чистый бета-излучатель со средней энергией бета-излучения 18 кэВ, что позволяет на его основе создавать миниатюрные и безопасные в обращении бета-вольтаические атомные батареи микроваттного диапазона мощностей со сроком службы не менее 50 лет для применения в разнообразных приборах и устройствах микросистемной техники.

**Ключевые слова:** радионуклид, никель-63, бета-излучение, атомная батарея, центрифужное разделение, бета-вольтаический эффект, полупроводник, срок службы

### Введение

Происходящий в настоящее время переход от микро- к наноэлектронике обозначил проблему энергообеспечения различных систем и автономных устройств этого класса. Продолжающееся уменьшение характерных размеров полупроводниковых элементов понижает энергопотребление, и для ряда систем мониторинга и контроля оказывается достаточно энергии милли- и микроваттного диапазона. Разрабатываемые сейчас образцы микросистемной техники не смогут обладать должной автономностью и длительностью действия при оснащении их традиционными химическими источниками тока.

Развитие и практическое внедрение изделий микросистемной техники ставит задачу создания миниатюрных энергоемких автономных источников нового поколения микроваттного диапазона мощности, отвечающих современным требованиям по таким показателям, как удельная энергоемкость, срок службы, время непрерывной работы, надежность в течение всего срока службы в широком диапазоне температур. Наиболее полно поставленным требованиям отвечают атомные батареи (АБ), работающие на бета-вольтаическом эффекте — аналоге фотоэлектрического эффекта, от-

личающемся тем, что образование электрон-дырочных пар в кристаллической решетке полупроводника происходит под воздействием бета-частиц, а не светового излучения.

Бета-вольтаический преобразователь представляет собой полупроводниковый элемент с  $p-n$ -переходом, контактирующий с радиоактивным источником бета-частиц (т. е. электронов). Энергия, необходимая для образования пар, получается за счет их взаимодействия с электронами кристаллической решетки, а число образовавшихся неравновесных носителей пропорционально энергии потока падающих частиц.

Перспективными чистыми бета-излучателями для этой цели являются изотопы тритий (период полураспада 12,3 года) и никель-63 (период полураспада 100 лет). Их удельная энергоемкость более чем в миллион раз превышает таковую для наилучших химических источников тока. Использование этих бета-источников не создает дозиметрических проблем ввиду малой энергии бета-спектра указанных изотопов ( $E_{cp} = 6$  кэВ для трития и  $E_{cp} = 18$  кэВ для никеля-63), так что внешняя оболочка прибора полностью защищает от излучения.

Первые работы по бета-вольтаическим преобразователям, в которых использовался радионуклид стронций-90, относятся к середине 50-х годов прошлого столетия [1]. Впоследствии аналогичные исследования проводились с использованием прометия-147 и трития [2–4].

В последнее десятилетие, после опубликования информации о создании в Корнельском университете США атомной батареи на никеле-63 с использованием технологии микроэлектронных механических систем [5], интерес к таким работам значительно возрос. Помимо АБ на никеле-63 появились публикации о создании фирмой Sity Labs (США) коммерческой бета-вольтаической АБ на тритии [6]. Электрическая мощность разработанных АБ на никеле-63 и тритии составляет несколько десятков нановатт.

Имеется информация о разработке и создании лабораторных образцов бета-вольтаических АБ на никеле-63 микроваттной мощности [7].

### Расчетные оценки характеристик бета-вольтаических АБ на тритии и никеле-63

На наш взгляд, самым перспективным изотопом для бета-вольтаических АБ является никель-63. К его преимуществам по отношению к тритию можно отнести:

- агрегатное состояние. Никель — это тугоплавкий, пластичный, инертный, легко поддающийся обработке металл, "сам себе носитель";
- в 3,5 раза большую энергию бета-частиц;
- в 8 раз больший период полураспада — 100 лет, у трития — 12 лет;
- что касается радиационных эффектов, то по сравнению с тритием у никеля-63 имеется отличие, обусловленное тем, что после распада

образуется не инертный газ — гелий, а химически активная медь. Если никель-63 используется в составе металла или химического соединения (соль, интерметаллид и т. п.), то ожидать каких-либо нежелательных явлений не приходится.

Бета-распад никеля-63 происходит без сопутствующего  $\gamma$ -излучения, а возникающее при торможении  $\beta$ -частиц тормозное и рентгеновское излучение настолько "мягкое", что полностью поглощается конструктивными элементами устройства. Поэтому АБ, использующая никель-63, может быть совершенно "чистой" и не оказывать какого-либо радиационного воздействия на окружающую среду [8, 9].

Срок службы никелевой батареи скорее всего будет определяться процессом деградации полупроводникового преобразователя, а не распадом излучателя. Хотя справедливости ради надо отметить, что максимальная энергия  $\beta$ -частиц — 65 кэВ — намного ниже порога радиационных повреждений, равного ~300 кэВ для кремния или арсенида галлия [10].

На рис. 1 показано изменение мощности батареи (активности  $\beta$ -излучателя) на основе никеля-63 (кривая 1). Для сравнения показана эта же зависимость для тритиевой батареи (кривая 2). (На рис. 1 дана также кривая 3, рассчитанная для интерметаллида  $LaNi_5T_{6,7}$  с одновременным присутствием никеля-63 и трития [11]).

Если срок службы АБ определяется допустимым снижением мощности в конце эксплуатации, преимущество никелевой АБ неоспоримо (табл. 1).

Очевидно, что тритиевая и никелевая АБ имеют различные, хотя и частично перекрывающиеся, области применения. При сроке службы, исчисляемом десятилетиями, никель-63 находится вне конкуренции.

Таблица 1

Срок службы АБ

Допустимое снижение мощности в конце эксплуатации, %	Срок службы АБ, лет	
	Тритиевая	Никелевая
10	<2	15
20	~4	32
30	6,3	51
40	9	74

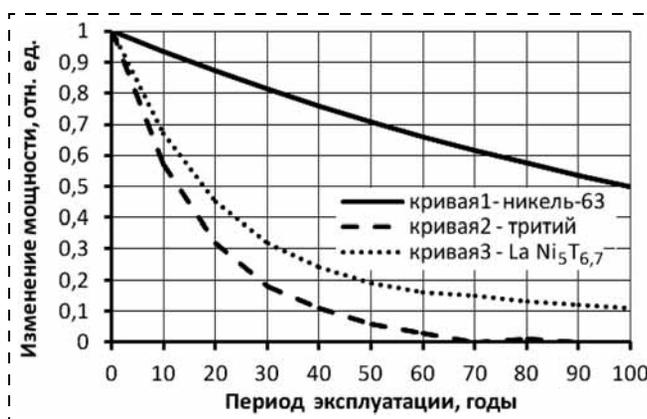


Рис. 1. Изменение мощности излучателей

Область применения никелевых АБ может быть очень широкой. Это кардио- и другие биостимуляторы, имплантируемые в тело пациента, дозаторы лекарственных препаратов, бесперебойное питание блоков памяти информационных систем, приборы мобильной связи, беспроводные сигнализаторы и пожароизвещатели, а также разнообразные применения в космической технике, микроэлектронике, нанотехнологиях [12].

### Существующий способ получения никеля-63

Радиоактивного никеля-63 в природе нет, это искусственный изотоп. В настоящее время реальным способом его получения является только облучение мишеней нейтронами в ядерном реакторе. Рассмотрим, какие ядерные реакции приводят к образованию никеля-63 и могут ли они быть использованы для его промышленного производства [13, 14].

На рис. 2 показаны реакции, приводящие к образованию никеля-63.

Реакция ( $n, \gamma$ ) на никель-62 идет на тепловых и на быстрых нейтронах, остальные — только на быстрых и являются пороговыми [8].

Каждая из этих реакций может быть интересной, например, на цинке — с точки зрения изотопной чистоты. Однако практическому применению 1-й и 3-й реакций (табл. 2) мешает очень малое сечение взаимодействия. Использование второй реакции — на меди — обременено присутствием второго стабильного изотопа в природной меди ( $\text{Cu}^{65}$  — 30,9 %). Так что недаром традиционным способом получения никеля-63 является использование реакции ( $n, \gamma$ ):

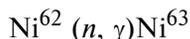


Таблица 2

Сечения пороговых реакций с образованием никеля-63

Реакция	Энергия реакции, МэВ	Сечение в спектре деления, мбарн
1. ${}_{28}\text{Ni}^{64} (n, 2n) {}_{28}\text{Ni}^{63}$	-9,66	0,5
2. ${}_{29}\text{Cu}^{63} (n, p) {}_{28}\text{Ni}^{63}$	0,716	9,8
3. ${}_{30}\text{Zn}^{63} (n, \alpha) {}_{28}\text{Ni}^{63}$	2,274	0,28

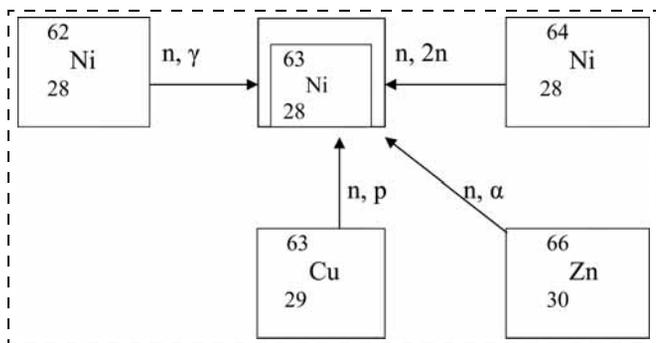


Рис. 2. Реакции образования никеля-63

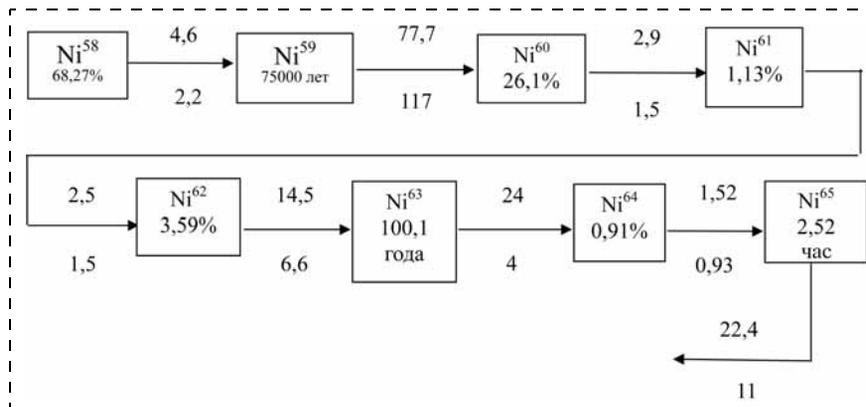


Рис. 3. Схема образования никеля-63 из никеля-62 в природной смеси изотопов

Рассмотрим ее подробнее.

Схема образования никеля-63 при облучении природного никеля в ядерном реакторе показана на рис. 3. Эта же схема справедлива и тогда, когда изотопный состав мишени не является природным. (В ячейках под символом изотопа указано его содержание в природной смеси или период полураспада; цифры над стрелками — сечение захвата тепловых нейтронов в барнах; под стрелками — резонансный интеграл в миллибарнах [8, 13]).

Процессу накопления никеля-63 присущи особенности, обусловленные большим периодом полураспада никеля-63 (100,1 лет) и довольно большим сечением выгорания — 24 барн при сечении накопления — 14,5 барн. В итоге:

- накопление никеля-63 практически однозначно определяется не потоком нейтронов или временем, а их произведением — флюенсом нейтронов. Эта зависимость, справедливая для всех потоков и лишь слегка варьирующая при изменении доли быстрых нейтронов [13], показана на рис. 4 — облучение в потоке тепловых нейтронов  $10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  при относительной доле быстрых нейтронов в спектре  $g = 0$  и 0,4;
- радиоактивным распадом никеля-63 в процессе облучения, длящемся не более 2...5 лет (в зави-

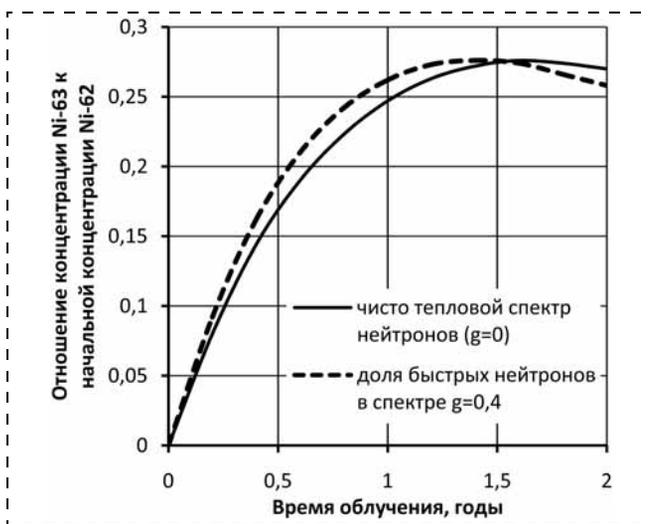


Рис. 4. Накопление никеля-63 в нейтронном потоке  $\Phi = 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

симости от  $\Phi$  — плотности потока нейтронов), в первом приближении можно пренебречь (распадается не более 1 % в год);

- скорость накопления никеля-63 в начальный момент определяется нейтронным потоком — чем он выше, тем больше скорость;
- по мере облучения скорость накопления падает из-за выгорания никеля-62, а скорость выгорания никеля-63 возрастает вследствие роста его концентрации;
- при некотором флюенсе эти скорости выравниваются, концентрация никеля-63 в мишени достигает максимального значения и при дальнейшем облучении падает. Никакими ухищрениями нельзя добиться, чтобы в мишени даже из 100 %-ного никеля-62 концентрация никеля-63 в процессе облучения превысила ~30 % от исходной концентрации никеля-62. Это соответствует активности ~15,6 Ки на 1 г мишени. Если начальное содержание никеля-62 в мишени меньше 100 %, концентрация никеля-63, выраженная в кюри на грамм мишени, пропорционально снижается;
- добиваться достижения максимального содержания никеля-63 в мишени экономически неоправданно дорого. Расчетом затрат получено, что оптимальным является накопление примерно 12...13 Ки на грамм, что достигается при флюенсе  $\Phi = 2,6 \cdot 10^{22}$  нейтрон  $\cdot$  см<sup>-2</sup>.

Пока единственный практически реализованный способ получения никеля-63 заключается в облучении высокообогащенной (95...97 %) никелем-62 мишени в реакторе с возможно более высоким потоком тепловых нейтронов, желательного уровня  $10^{15}$  см<sup>-2</sup>  $\cdot$  с<sup>-1</sup> [15]. Принципиальные ограничения не позволяют получить в облученной мишени концентрацию никеля-63 более 27 % от исходной концентрации никеля-62, а практически эту величину редко поднимают выше 18 % (из-за резкого увеличения времени облучения). Как будет показано ниже, никель с такой концентрацией никеля-63 малоприспособен для АБ, он в десятки раз уменьшает эффективность созданных на его основе бета-вольтаических АБ. Кроме того, доступность источника нейтронов и экономические показатели остаются желать лучшего. Пока речь идет о незначительных — граммовых — количествах наработки никеля-63, такой способ не вызывает сомнений, несмотря на очень высокую стоимость обогащенного исходного сырья и необходимость использования для облучения ядерного реактора с супервысоким нейтронным потоком, например СМ-2, но с очень ограниченным облучательным объемом. Таким образом, существующий способ получения никеля-63 не пригоден для создания бета-вольтаических АБ ввиду низкой концентрации никеля-63 в конечном продукте, ограниченного объема выпуска и высокой стоимости.

### Изменение параметров никелевых АБ от степени обогащения никеля-63

Представляется, что для АБ надо использовать изотопно-чистый, 100 %-ный никель-63, дабы не ухудшать параметры присутствием ненужных ста-

бильных изотопов никеля. Однако это невозможно. Каким бы известным способом ни производили искусственный изотоп никель-63, он получается в смеси с другими изотопами никеля, так что выделение чистого никеля-63 — это нетривиальная задача изотопного обогащения, в которой стремление к "абсолютной чистоте" катастрофически дорого и, вообще-то, недостижимо. Необходимо определить степень изотопной чистоты (обогащения), допустимую с позиции компромисса между параметрами батареи, стоимостью и технической осуществимостью.

Для этого сравним, как меняются параметры АБ при изменении обогащения никеля изотопом никель-63. Для примера возьмем гипотетическую АБ электрической мощностью 1 мВт. При КПД = 1 % (тепловая мощность 100 мВт) АБ содержит 17,5 г никеля-63, имеет форму квадрата 30 × 30 мм, число микрометровых слоев никеля и пятимикрометровых слоев преобразователя 2220, толщина батареи при 100 %-ном обогащении никеля-63 — 13,3 мм. Очевидно, что если сохранять количество никеля-63 в АБ, то при снижении его обогащения, т. е. массовой доли никеля-63 в никеле, общая масса никеля и, соответственно, толщина никелевых слоев возрастают обратно пропорционально снижению обогащения. На рис. 5 показано, как при этом будут увеличиваться объем АБ и масса излучателя (кривые 1 и 2), а кривая 3 показывает это увеличение в процентах от исходного состояния, которым считается батарея со 100 %-ным никелем-63.

По мере разбавления никеля-63 сначала наблюдается пропорциональность: на сколько процентов разбавлен излучатель, примерно на столько же процентов ухудшаются (увеличиваются) массо-габаритные характеристики батареи. Это справедливо в диапазоне от 100 до примерно 70 %, затем характеристики начинают быстро ухудшаться.

Если сохраняются неизменными нагрузка никеля-63, площадь излучателя и вся преобразователь-

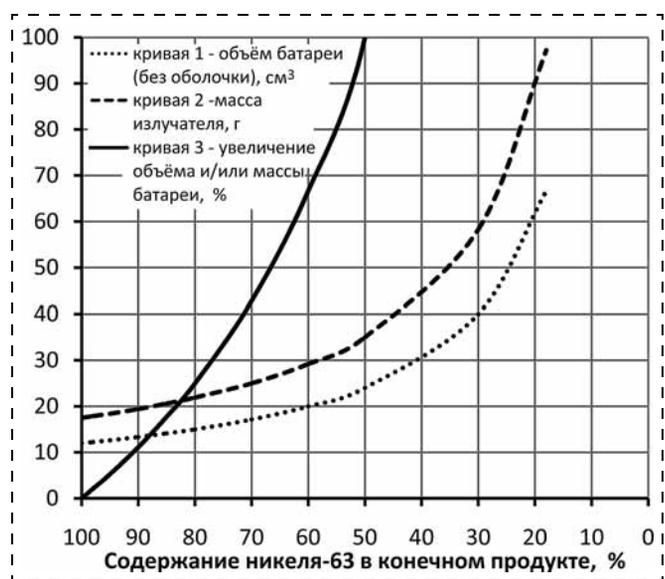


Рис. 5. Зависимость параметров АБ от степени обогащения никеля-63

Таблица 3

**Влияние обогащения никеля-63 на параметры АБ при неизменной площади излучателя**

Обогащение никеля-63, %	Толщина излучателя $t$ , мкм	Выход $\beta$ -частиц	Объем АБ, см <sup>3</sup>	Относительная мощность, %	Потеря эффективности (мощности), %
100	1,00	0,430	12	100	0
98	1,02	0,427	12,04	98,2	1,8
95	1,05	0,416	12,10	95,7	4,3
90	1,11	0,396	12,22	91,1	8,9
85	1,18	0,375	12,36	86,3	13,7
80	1,25	0,353	12,50	81,2	18,8
70	1,42	0,304	12,84	69,9	30,1
60	1,67	0,249	13,34	57,3	42,7
50	2,00	0,189	14,00	43,5	56,5
30	3,33	0,062	16,66	14,3	85,7
18	5,55	0,0098	21,10	2,3	97,7

ная часть АБ, то число образующихся в АБ  $\beta$ -частиц при снижении обогащения никеля-63 также остается неизменным, но эффективность их использования (проникновения в объем преобразователя) уменьшается за счет большего самопоглощения в утолщенном слое никеля. Тепловая мощность АБ сохраняется, но электрический КПД уменьшается. Результаты соответствующих расчетов показаны в табл. 3 и на рис. 5, 6. Из них видно, что совершенно незачем добиваться 100 %-ного обогащения никеля-63. Вполне достаточно ограничиться диапазоном 75...90 %. При этом габаритные размеры АБ увеличиваются не более чем на треть (кривая 3 на рис. 5), незначительно теряется эффективность использования  $\beta$ -излучения, не надо увеличивать загрузку никеля-63, а трудности после реакторного обогащения уменьшаются многократно.

Из табл. 3 видно также, насколько далеки от "эталонных" параметры АБ с никелем-63, произведенным по нынешней технологии (последняя строчка, обогащение 18 %). Ее эффективность в 43 раза ниже достижимой в идеале. Отсюда понятно, почему в настоящее время разработка никелевой АБ не носит ажиотажный характер — в мире нет доступного даже для опытных образцов высокообога-

щенного никеля-63 (с обогащением, по крайней мере, более 70 %). Доступен в минимальных количествах 18 %-ный, не пригодный для создания эффективной АБ. В этом состоит особенность нынешней ситуации.

### Производство никеля-63 высокого обогащения

Для крупномасштабного производства никеля-63 предложена, технически и экономически обоснована новая концепция промышленного производства никеля-63 с концентрацией в конечном продукте 80...90 %, приемлемой как для потребителя, так и для производителя [16].

Суть новой концепции в том, чтобы заменить облучение малых количеств высокообогащенного никеля-62 (95...97 %) в реакторе с супервысоким нейтронным потоком ( $10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) на облучение большого количества относительно дешевого среднеобогащенного по никелю-62 сырья (70...80 %) в ядерных реакторах с "заурядным" потоком тепловых нейтронов в диапазоне  $5 \cdot 10^{13} \dots 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  и использовать два обогатительных каскада — один до облучения сырья, второй — радиоактивный — после облучения. Таким образом, облучение проводить не в реакторе СМ-2, а в ядерных реакторах АЭС или в промышленных реакторах, где облучение не такое "дорогое", как в ядерном реакторе типа СМ-2. Такой подход позволит облучать практически постоянно большое число никелевых мишеней, не нарушая плановых режимов работы ядерных реакторов. После двух—трехлетнего цикла облучения облученные мишени проходят радиохимическую очистку от  $\gamma$ -излучающих изотопов и поступают на центрифужное разделение для получения никеля-63 нужной концентрации. При этом весьма важен опыт, накопленный в России при обогащении других радионуклидов: железа-55, олова-119<sup>m</sup>, криптона-85. Оставшийся после отбора никеля-63 продукт, практически с исходной степенью концентрации по никелю-62 и несколько обогащенный по никелю-63, возвращается на повторное облучение.

На рис. 7 (см. третью сторону обложки) представлена схема промышленного получения никеля-63.

Так реализуется практически безотходный замкнутый технологический цикл по исходному и целевому продуктам, в котором особую роль играет заново разработанная схема обращения с изотопом никель-64 [16].

Приведенные на схеме цифры показывают изменение изотопного состава продукта по мере прохождения технологического цикла. Первоначально мишень обогащена никелем-62 до 79,4 %; после двух лет облучения в мишени будет содержаться 6,4 % никеля-63, а после радиохимической очистки и прохождения продуктом второго центробежного каскада можно получить препарат, обогащенный по никелю-63 до

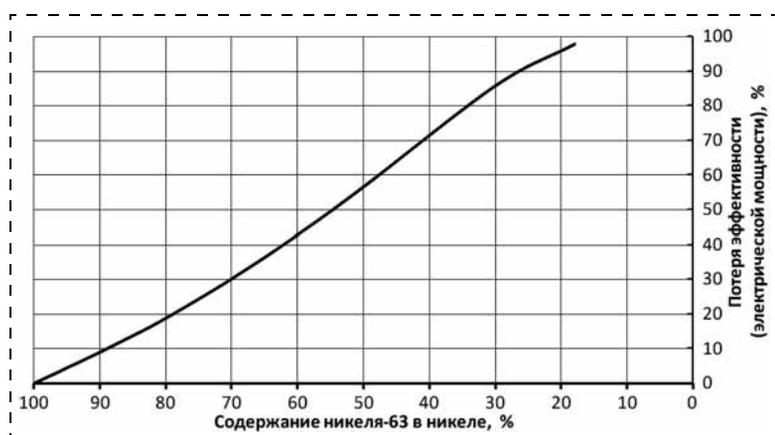


Рис. 6. Влияние обогащения никеля-63 на эффективность АБ

81,2 %. Извлечение никеля-63 в тяжелую фракцию — целевой продукт — составит 75 %. Легкая фракция — отвал — будет содержать 1,7 % никеля-63 и 77 % никеля-62 и должна возвращаться на повторное облучение.

Результаты проведенных расчетных исследований подтвердили достижимость нужной концентрации никеля-63 в конечном продукте. Техническая возможность осуществления масштабного производства никеля-63 уже не вызывает сомнения. Необходимы дальнейшие технико-экономические исследования и оптимизация отдельных стадий процесса.

Включение в технологическую цепь второго обогатительного каскада порождает желание избавиться от первого, т. е. облучать природный никель. Такой вариант подробно исследован и признан непригодным. Во-первых, присутствие в мишени изотопов никеля 58-го, 60-го и 61-го, являющихся родоначальниками цепочек, приводящих в конце концов к появлению вредоносного кобальта-60, резко ухудшают дозиметрическую характеристику продукта и усложняют его радиохимическую очистку. Во-вторых, для получения всего лишь 1 кг в год продукта требуется облучать неприемлемые количества сырья (даже в потоке  $10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  около 250 кг в течение года). Такой возможности просто нет. В-третьих, после обогащения возникает загрязненный никелем-63 отвал, который не пригоден для нового облучения.

Подводя итог вышеизложенному, предлагаемый путь создания крупномасштабного производства высокообогащенного никеля-63 представляется не имеющим альтернативы. Расчеты реакторного и обогатительных переделов, а также проверка способности радиохимии обеспечить необходимую дозиметрическую чистоту показали реальную осуществимость предлагаемой технологии на существующих предприятиях Росатома.

## Выводы

1. Атомные батареи бета-вольтаического типа на никеле-63 со сроком службы 50 лет и более являются новым поколением миниатюрных, энергоёмких, надежных, полностью автономных источников питания, имеющих весьма широкое предназначение.

2. Существующий способ получения никеля-63 не пригоден для создания эффективных бета-вольтаических атомных батарей ввиду низкого обогащения никеля-63 в конечном продукте, ограниченных объемов выпуска и его высокой стоимости.

3. Для коммерческого использования уровень обогащения должен быть 70...90 %, в этом случае

атомные батареи смогут использовать электроны, излучаемые никелем-63, в десятки раз эффективнее, чем при нынешних 18 %. Выпуск такого высокообогащенного никеля-63 возможен только при его промышленном, постоянно действующем производстве, оправдывающем включение в технологический процесс второго обогатительного каскада.

4. Разработанный и предлагаемый способ получения никеля-63 высокого обогащения позволяет создать практически безотходный, непрерывный и рентабельный процесс крупномасштабной наработки никеля-63 для организации на его основе выпуска эффективных бета-вольтаических атомных батарей как микро- и милливаттного диапазона мощности для медицины и изделий микросистемной техники, так и для многообразных иных применений, в том числе космических.

## Список литературы

1. Rappaport P. I., Loferski J. J., Lindery E. G. A study program of possible uses new principle // *Nucleonics*. 1957. Vol. 15. P. 99.
2. Olsen L. C., Seeman S. E., Griffen B. I. Betavoltaic nuclear electric power sources // *Trans. Electron Devices*. 1969. Vol. 2. 481 p.
3. Гусев В. В., Кодюков В. М., Почтаков А. А., Пустовалов А. А. Особенности преобразования энергии радиоактивного распада в электрическую с использованием кремниевых полупроводников с  $p-n$ -переходом // *Радиационная техника*. 1975. Вып. 11. С. 61—67.
4. Лазаренко Ю. В., Пустовалов А. А., Шаповалов В. П. Малогабаритные ядерные источники электрической энергии. М.: Энергоатомиздат, 1992.
5. Amit Lal et al. Direct charge radioisotope activation and power generator. Патент США № 6479920, 2002 г.
6. URL: <http://www.citylabs.net>
7. Пустовалов А. А., Гусев В. В., Задзе В. В., Петренко Н. С., Цветков Л. А., Тихомиров А. В. Бетаэлектрический источник тока на основе никеля-63 // *Атомная энергия*. 2007. Т. 103. Вып. 6.
8. Таблицы физических величин. Справочник. М.: Атомиздат, 1976.
9. Гусев Н. Г., Машкович В. П., Суворов А. П. Физические основы защиты от излучений. М.: Атомиздат, 1980.
10. Вавилов В. С., Кикелидзе Н. П., Смирнов Л. С. Действие излучений на полупроводники. М.: Наука, 1988 г.
11. Гидриды металлов / Пер. с англ. / Под ред. В. Мюллера М.: Атомиздат, 1973.
12. Баранов В. Ю., Паль А. Ф., Пустовалов А. А., Старостин А. Н., Суегин Н. В., Филиппов А. В., Фортгов В. Е. Радиоизотопные генераторы электрического тока // *Изотопы II. Свойства. Получение. Применение* / Под ред. В. Ю. Баранова. М.: Физматлит, 2005.
13. Герасимов А. С., Зарицкая Т. С., Рудик А. П. Справочник по образованию нуклидов в ядерных реакторах. М.: Энергоатомиздат, 1989.
14. Киселёв Г. В. Технология получения радиоактивных нуклидов в ядерных реакторах. М.: Энергоатомиздат, 1990.
15. Цыканов В. А., Клинов А. В. и др. Модернизация активной зоны реактора СМ для решения задач материалоуправления // *Атомная энергия*. 2002. Т. 93. Вып. 3.
16. Пустовалов А. А., Тихомиров А. В., Цветков Л. А. Способ получения радионуклида никель-63. Патент РФ № 2313149, 26.06.06.

**А. Я. Колпаков**<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук, зав. лаб.,  
e-mail: kolpakov@bsu.edu.ru,

**А. И. Поплавский**<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук, мл.  
науч. сотрудник,

**М. Е. Галкина**<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук, ст. науч.  
сотрудник,

**Д. А. Токарев**<sup>2</sup>, инженер ОТК,

**А. О. Беляева**<sup>2</sup>, тех. директор,

**Ж. В. Герус**<sup>1</sup>, магистрант,

<sup>1</sup> ФГАОУ ВПО "Белгородский государственный  
национальный исследовательский университет",

г. Белгород,

<sup>2</sup> ООО "Новые плазменные технологии",

г. Москва

## ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА В ВАКУУМЕ НА ВНУТРЕННИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЯХ, СФОРМИРОВАННЫХ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ПОДЛОЖКИ ОТНОСИТЕЛЬНО ОСИ ПОТОКА ИМПУЛЬСНОЙ УГЛЕРОДНОЙ ПЛАЗМЫ\*

Поступила в редакцию 18.04.2013

*Исследовано влияние вакуумного отжига на значение внутренних напряжений в аморфных углеродных алмазоподобных покрытиях двух типов, полученных импульсным вакуумно-дуговым методом при различной ориентации подложки относительно оси потока углеродной плазмы (DLC-I, DLC-II). Полученные результаты могут быть использованы при выборе режимов термообработки этих покрытий в целях снижения внутренних напряжений, что позволит расширить область применения DLC покрытий в микромеханике и МЭМС.*

**Ключевые слова:** внутренние напряжения, аморфные углеродные алмазоподобные покрытия, отжиг, дефекты

### Введение

Аморфные алмазоподобные углеродные покрытия или DLC (*diamond-like carbon*) являются химически инертными и обладают уникальными механическими, трибологическими и электрическими свойствами, что делает их перспективным материалом для использования в микромеханике и МЭМС [1].

Формирование DLC покрытий в термодинамически неравновесных условиях (ионная бомбардировка подложки, температура которой порядка комнатной) физическими или PVD (*physical vapor*

\* Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, в рамках Государственного задания подведомственным вузам на выполнение НИОКР, проект № 2.3451.2011 и соглашения 14.A18.21.0940.

*deposition*) методами приводит к возникновению аномально высоких внутренних (остаточных) напряжений сжатия, значение которых достигает 10 ГПа и более [2–6]. В зависимости от доминирующей структуры ближнего порядка DLC покрытия условно делят на две категории: *ta-C* (*tetrahedral amorphous carbon*), в которых преобладают атомы с  $sp^3$ -гибридизацией, и *a-C* (*amorphous carbon*), в которых преобладают атомы с  $sp^2$ -гибридизацией, при этом наибольшее значение внутренних напряжений характерно для *ta-C* [7].

Основным способом снижения внутренних напряжений является последующий отжиг системы "покрытие—подложка", который приводит к их частичной или полной релаксации [2–4]. Согласно работам [2, 4], полное снятие напряжений в *ta-C* покрытии происходит при отжиге в диапазоне температур 600...700 °С в бескислородной среде и сопровождается минимальными изменениями структуры и свойств. Авторы предполагают, что аморфная матрица *ta-C* покрытия состоит преимущественно из ковалентно связанных атомов с  $sp^3$ -гибридизацией (~80 %), а так как длина связи атомов углерода с  $sp^3$ -гибридизацией больше, чем у атомов с  $sp^2$ -гибридизацией, то механизм релаксации напряжений в процессе термического отжига связывают с преобразованием части атомных связей из  $sp^3$ - в  $sp^2$ -гибридизацию.

В работе [5] предложен способ формирования углеродных покрытий с более низким уровнем внутренних напряжений, суть которого заключается в том, что ось потока углеродной плазмы размещают под углом 15...45° к поверхности подложки. В работе [6] показано, что увеличение угла наклона плазменного потока относительно нормали к поверхности подложки с 0 до 70° позволяет снизить значение напряжений более чем в 2 раза. Там же исследована динамика изменения внутренних напряжений в процессе последующего отжига системы "покрытие—подложка" до 350 °С в воздушной среде. Возникновение внутренних напряжений в DLC покрытиях и их релаксацию при термическом отжиге связывают с процессами генерации и последующей эволюции радиационных дефектов [3, 5, 6].

Данная работа является продолжением работы [6] и посвящена изучению влияния отжига в вакууме DLC покрытий, сформированных при различной ориентации подложки относительно оси потока импульсной углеродной плазмы, на значение внутренних напряжений, в целях определения основных закономерностей и механизмов их возникновения и релаксации.

Комбинационное рассеяние света (КРС) является общепринятым методом характеристики кристаллических, нанокристаллических и аморфных углеродных структур [8], поэтому исследования внутренних напряжений дополнены исследованиями спектров КРС.

## Методика проведения исследований

Углеродные покрытия толщиной 90...100 нм наносили на подложки монокристаллического кремния КЭФ 4,5(100) с использованием импульсного источника углеродной плазмы [9]. Технологические параметры: емкость накопителя — 2000 мкФ, напряжение зарядки накопителя — 300 В, частота следования импульсов разряда — 2 Гц, температура подложки <math><100\text{ }^\circ\text{C}</math>. Предварительно вакуумную камеру откачивали до давления  $\sim 10^{-3}$  Па и проводили очистку поверхности кремния от загрязнений и естественного окисного слоя путем ионной бомбардировки ионами аргона. Были получены два типа образцов углеродных покрытий: DLC-I, который осаждали при расположении поверхности подложки перпендикулярно геометрической оси плазменного потока ( $\alpha = 0^\circ$ ); DLC-II, осаждаемый по технологии, предложенной в работе [5], угол  $\alpha$  между осью плазменного потока и нормалью к поверхности подложки составлял  $60...70^\circ$ ; для обеспечения равномерности покрытия по толщине подложку вращали. Измерение внутренних напряжений проводили по методике, описанной в работе [6]. Отжиг системы "покрытие—подложка" проводили в вакуумной печи GHA 12/600 компании CARBOLITE в диапазоне температур  $200...1000\text{ }^\circ\text{C}$ . Остаточное давление в печи  $\sim 10^{-2}$  Па, скорость нагрева  $8\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ , выдержка при заданной температуре 10 мин, вынимали образцы из печи при температуре  $<100\text{ }^\circ\text{C}$ . Спектры КРС получали на спектрометре Renishaw inVia Basis, длина волны лазера 514 нм.

## Результаты исследований и их обсуждение

Внутренние напряжения сжатия в покрытиях DLC-I и DLC-II до отжига равны  $10,4 \pm 0,7$  и  $4,2 \pm 0,3$  ГПа, соответственно. По результатам предварительных исследований, увеличение угла падения ионов углерода от  $\alpha = 0^\circ$  до  $\alpha = 70^\circ$  приводит к уменьшению глубины залегания радиационных дефектов, их количества, изменению распределения отдельных видов дефектов по глубине, а также к снижению эффекта уплотнения формируемого покрытия в результате ионной бомбардировки. Кроме того, с использованием спектроскопии характеристических потерь энергии электронов и определения энергии плазмона установлено, что покрытия типа DLC-II имеют большее количество атомов с  $sp^2$ -гибридизацией по сравнению с покрытиями DLC-I [6].

На рис. 1 представлены зависимости внутренних напряжений в покрытиях DLC от температуры отжига, выраженные в относительных единицах. Отжиг покрытий типа DLC-I в вакууме при температуре  $800\text{ }^\circ\text{C}$  позволяет снизить уровень внутренних напряжений с 10,4 до 0,2 ГПа. Стоит отметить, что ход кривой релаксации внутренних напряжений для покрытий DLC-I в интервале тем-

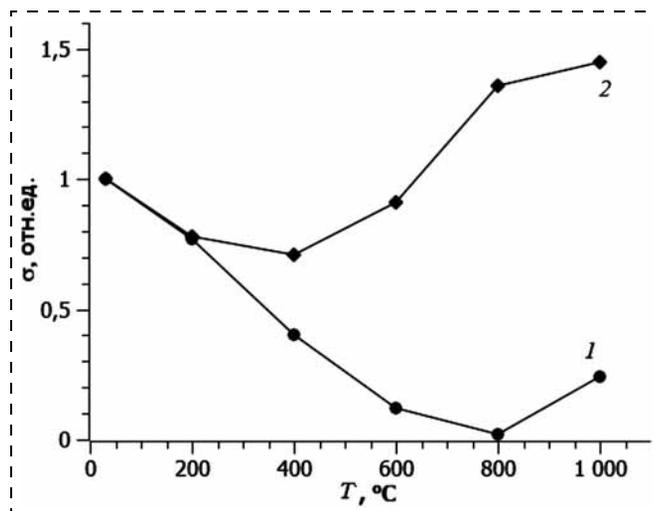


Рис. 1. Зависимости внутренних напряжений  $\sigma$  в покрытиях типа DLC-I (кривая 1) и DLC-II (кривая 2) от температуры вакуумного отжига

ператур от комнатной до  $800\text{ }^\circ\text{C}$ , аналогичен кривой, полученной авторами работы [4] при отжиге  $ta$ -С покрытий в потоке сухого азота и в вакууме, это говорит о том, что их структуры в целом идентичны. При дальнейшем повышении температуры до  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  нами обнаружено некоторое повышение напряжений в покрытиях DLC-I.

Отжиг покрытий типа DLC-II до температуры  $400\text{ }^\circ\text{C}$  приводит к незначительному снижению внутренних напряжений, а при дальнейшем повышении температуры происходит их увеличение. При температуре отжига  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  внутренние напряжения приблизительно в 1,5 раза возрастают относительно своего исходного значения до отжига. Данный факт не может быть объяснен одним лишь преобразованием части атомов из  $sp^3$ -гибридизации в  $sp^2$ -гибридизацию.

Необходимо уточнить, что в случае аморфного состояния дефектами принято считать нарушения ближнего порядка расположения атомов [10]. Одной из главных характеристик ближнего порядка является координационное число, следовательно, структура с сохраняющейся координацией для данного сорта атомов будет являться идеальной, а локальные участки с координацией, отличной от нормальной, будут представлять дефекты структуры. Простейшим дефектом при таком определении является такой, у которого только один атом имеет координацию, на одну единицу отличающуюся от идеальной, т. е. от координации  $Z$ , характерной для "идеального" состояния. Дефект типа вакансии можно представить в виде совокупности  $Z$  простейших дефектов с координацией  $Z - 1$  у окружающих атомов, а дефект типа межузельного атома — в виде совокупности  $Z$  простейших дефектов с координацией  $Z + 1$ . Различные комбинации простейших дефектов друг с другом приводят к многообразию сложных то-

чечных дефектов, существующих в аморфных структурах, которые имеют различные энергии миграции и объем, что имеет существенное значение при анализе процессов, происходящих при отжиге.

На наш взгляд, изменение внутренних напряжений при отжиге связано не только с преобразованием атомов из  $sp^3$  - в  $sp^2$ -гибридизацию, но также с термически активированным процессом эволюции дефектов и их комплексов. Снижение напряжений вызвано в основном процессами уменьшения количества дефектов типа межузельного атома в результате аннигиляции, рекомбинации, а также их миграции к стокам. Повышение напряжений может быть вызвано объединением дефектов вакансионного типа с образованием комплексов вакансий и даже пор. Сравнивая кривые отжига покрытий DLC-I и DLC-II, можно предположить, что первые имеют большее количество дефектов межузельного типа, обладающих широким диапазоном энергий активации миграции.

Основными особенностями спектра КРС, полученного в видимой области (длина волны лазера 514 нм) являются пики  $G$  и  $D$ . Пик  $G$  обусловлен колебаниями любых пар углеродных атомов с  $sp^2$ -гибридизацией и лежит в диапазоне  $1500...1630 \text{ см}^{-1}$ .

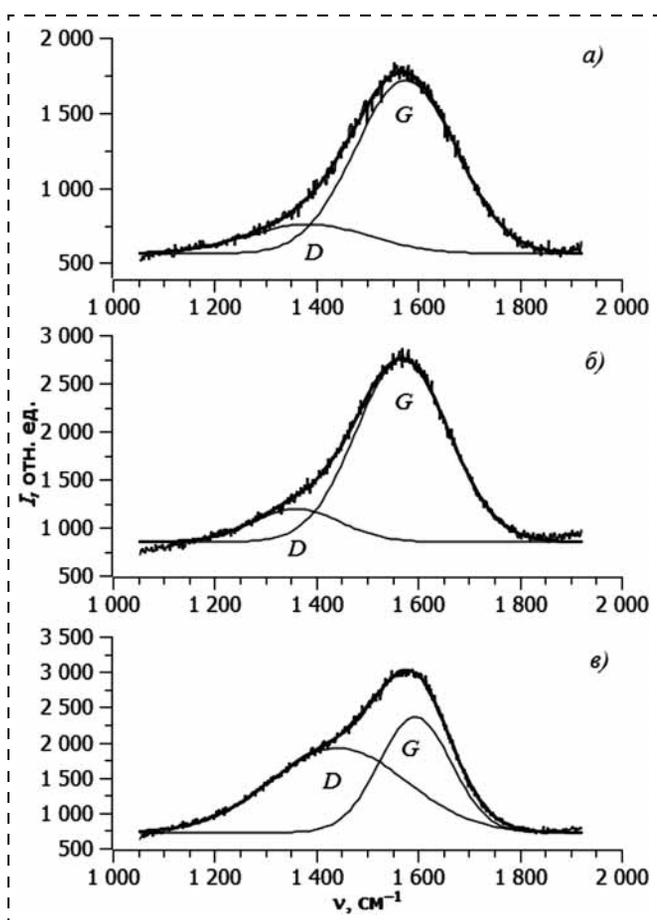


Рис. 2. Спектры комбинационного рассеяния покрытий типа DLC-I исходного (а) и отожженных в вакууме при 600 °С (б) и 1000 °С (в)

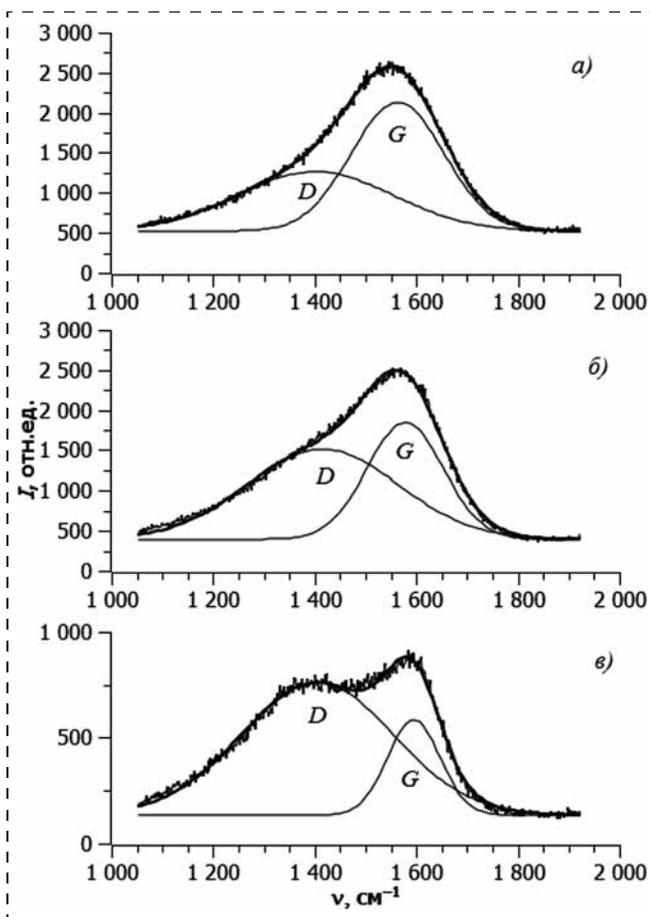


Рис. 3. Спектры комбинационного рассеяния покрытий типа DLC-II, исходного (а) и отожженных в вакууме при 600 °С (б) и 1000 °С (в)

Появление пика  $D$  в окрестности  $1355 \text{ см}^{-1}$  в графите связано с процессом разупорядочения, а в аморфном углероде, наоборот, указывает на процесс упорядочения.

Чтобы получить информацию о положениях пиков  $G$  и  $D$ , мы представили экспериментально полученные спектры КРС в виде суммы двух кривых Гаусса (рис. 2, 3). О структурных изменениях, происходящих в покрытиях DLC в результате их отжига, будем судить по положению пика  $G$  и отношению интегральных интенсивностей пиков  $D$  и  $G$  ( $I_D/I_G$ ). Для этого воспользуемся трехстадийной феноменологической моделью изменения КРС спектров при переходе от графита к  $ta$ -C, учитывая при этом цикл гистерезиса, связанный с обратным переходом [8].

На рис. 2 представлены обработанные КРС спектры покрытия типа DLC-I в исходном состоянии и после отжига в вакууме при температурах 600 и 1000 °С. Спектры исходного образца и отожженного при 600 °С представляют собой слабо асимметричный пик с отсутствием явного разделения пиков  $D$  и  $G$ . Для исходного образца положение пика  $G$  соответствует  $1572 \text{ см}^{-1}$ , а  $I_D/I_G = 0,17$ . Отжиг образцов при температуре 600 °С не приводит к заметным изменениям в спектре КРС, положение

ние пика  $G$  соответствует  $1570 \text{ см}^{-1}$ , а  $I_D/I_G = 0,18$ . Такие спектры характерны для  $ta$ -С пленок с низким содержанием  $sp^2$ -фазы [4, 8]. Дальнейшее повышение температуры отжига приводит к смещению пика  $G$  в сторону более высоких волновых чисел и увеличению отношения интегральных интенсивностей  $I_D/I_G$ . Для образцов, отожженных при температуре  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  центр пика  $G$  соответствует  $1594 \text{ см}^{-1}$ , а  $I_D/I_G = 0,73$ .

На рис. 3 представлены КРС спектры покрытия типа DLC-II в исходном состоянии и после отжига в вакууме при температурах  $600$  и  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ . Для исходного образца положение пика  $G$  соответствует  $1563 \text{ см}^{-1}$ , а  $I_D/I_G = 0,46$ . Отжиг образцов при температуре  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  приводит к смещению пика  $G$  в сторону более высоких волновых чисел ( $1578 \text{ см}^{-1}$ ) и увеличению отношения интегральных интенсивностей  $I_D/I_G = 0,77$ . При температуре отжига  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  центр пика  $G$  смещается до  $1595 \text{ см}^{-1}$ , и появляется ярко выраженный пик  $D$  ( $I_D/I_G = 1,39$ ).

Согласно [8], изменения в спектрах КРС, связанные со смещением пика  $G$  в сторону более высоких частот и одновременным увеличением отношения интегральных интенсивностей  $I_D/I_G$ , являются общим признаком перехода от  $ta$ -С покрытия к нанокристаллическому графиту, и обусловлены следующими процессами: 1) преобразованием части атомов углерода из  $sp^3$ -гибридизации в  $sp^2$ -гибридизацию; 2) кластеризацией атомов, имеющих  $sp^2$ -гибридизацию, с образованием достаточно упорядоченных структур.

В нашем случае покрытие типа DLC-II в исходном состоянии характеризуется более высокими значениями отношения  $I_D/I_G$ , чем покрытие типа DLC-I, что свидетельствует о наличии в DLC-II большего количества кластеров с  $sp^2$ -гибридизацией. Увеличение температуры отжига до  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  не приводит к структурным изменениям в покрытии DLC-I, в то время, как в покрытии DLC-II наблюдается процесс кластеризации. При  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  обнаружены структурные изменения в обоих покрытиях, однако в покрытии DLC-II они гораздо интенсивнее.

Сопоставляя кривые отжига (см. рис. 1) с результатами структурных исследований (см. рис. 2, 3), можно предположить, что снижение внутренних напряжений при отжиге происходит в основном в результате уменьшения количества дефектов межузельного типа без заметных структурных изменений. Тот факт, что увеличение внутренних напряжений в покрытиях обоих типов сопровождается структурными изменениями, подтверждает наше предположение о коалесценции дефектов вакансионного типа, в результате чего в углеродной матрице повышается свободный объем.

## Заключение

Экспериментально установлено, что отжиг покрытий DLC может приводить не только к сниже-

нию внутренних напряжений, но и к их увеличению. Вакуумный отжиг при температуре  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  покрытий типа DLC-I позволяет снизить значение внутренних напряжений с  $10$  до  $0,2$  ГПа с последующим повышением напряжений до  $2$  ГПа при температуре  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ; в случае покрытий типа DLC-II наблюдается снижение внутренних напряжений с  $4,2$  до  $3$  ГПа при  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  и повышением напряжений до  $6$  ГПа при температуре  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Динамика изменения внутренних напряжений аморфных покрытий DLC в процессе отжига определяется условиями формирования их структуры, и обусловлена следующими основными физическими процессами: 1) эволюцией точечных дефектов различных видов и их комплексов, которые возникают на этапе формирования покрытия под действием ионной бомбардировки с учетом особенностей этой бомбардировки; 2) преобразованием части атомных связей с  $sp^3$ -гибридизацией в  $sp^2$ -гибридизацию.

Полученные результаты исследований расширяют представления о физических процессах, происходящих при отжиге аморфных алмазоподобных углеродных покрытий, и могут быть использованы при выборе режимов термообработки этих покрытий в целях снижения внутренних напряжений, а также для их характеристики и идентификации. Это позволит расширить область применения DLC покрытий в микромеханике и МЭМС.

## Список литературы

1. Luo J. K., Fu Y. Q., Le H. R. et. al. Diamond and diamond-like carbon MEMS // J. Micromechanics and Microengineering. 2007. Vol. 17. P. S147—S163.
2. Friedman T. A., Sullivan J. P. Method of forming a stress relieved amorphous tetrahedrally-coordinated carbon film: patent 6103 305 US.
3. Inkin V. N., Kolpakov A. Y., Oukhanov S. I. et. al. Change of internal stress of carbon superhard condensates at a process of annealing // Diamond and Related Materials. 2004. Vol. 13. P. 1474—1479.
4. Ferrari A. C., Kleinsorge B., Morrison N. A. et. al. Stress reduction and bond stability during thermal annealing of tetrahedral amorphous carbon // Journal of Applied Physics. 1999. Vol. 85, No. 10. P. 7191—7197.
5. Колпаков А. Я., Инкин В. Н., Уханов С. И. Способ формирования сверхтвердого аморфного углеродного покрытия в вакууме: патент 2240376 С1 RU.
6. Колпаков А. Я., Поплавский А. И., Галкина М. Е. и др. Влияние угла наклона плазменного потока углерода к подложке и последующего отжига на внутренние напряжения и структуру углеродных наноразмерных покрытий, полученных импульсным вакуумно-дуговым методом // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 4. С. 40—45.
7. Robertson J. Diamond-like amorphous carbon // Materials Science and Engineering. 2002. Vol. 37. P. 129—281.
8. Ferrari A. C., Robertson J. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon // Physical Review B. 2000. Vol. 61, N 20. P. 14095—14107.
9. Маслов А. И., Дмитриев Г. К., Чистяков Ю. Д. Импульсный источник углеродной плазмы для технологических целей // Приборы и техника эксперимента. 1985. № 3. С. 146—149.
10. Золотухин И. В., Калинин Ю. А. Аморфные металлические сплавы // УФН. 1990. Т. 160, Вып. 9. С. 75—110.

УДК 621.315.592

**А. В. Войцеховский**<sup>1</sup>, д-р физ.-мат. наук, проф.,  
**Н. А. Кульчицкий**<sup>2, 3</sup>, д-р техн. наук, проф.,  
**А. А. Мельников**<sup>2</sup>, д-р физ.-мат. наук, проф.,  
**С. Н. Несмелов**<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,  
**С. М. Дзядух**<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,

<sup>1</sup>Томский государственный университет,  
e-mail: vav@elefot.tsu.ru,

<sup>2</sup>Московский государственный институт  
радиотехники, электроники и автоматики  
(Технический университет),  
e-mail: n.kulchitsky@gmail.com, melnikov@mirea.ru,

<sup>3</sup>Московский государственный университет  
имени М. В. Ломоносова

## ФОТОПРИЕМНИКИ И ФОТОПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА 8...14 МКМ НА ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ ТЕЛЛУРИДОВ КАДМИЯ — РТУТИ

*Поступила в редакцию 12.03.2013*

*Проведен анализ современного состояния и тенденций развития фотоприемников и фотоприемных устройств для спектрального диапазона 8...14 мкм на основе твердых растворов HgCdTe.*

**Ключевые слова:** фотоприемники, фотоприемные устройства, твердые растворы HgCdTe

### Введение

В настоящее время разработано значительное число типов детекторов для работы в практически важном диапазоне окна прозрачности атмосферы 8,0...14,0 мкм. В тепловидении наиболее широко используемым полупроводниковым материалом для ИК матриц продолжают оставаться твердые растворы теллурида кадмия — ртути из-за своих уникальных характеристик и высокой чувствительности в областях ИК спектра от 1 до 14 мкм [1—3]. Современные инфракрасные детекторы должны обладать хорошими пороговыми характеристиками и предельно высокой однородностью свойств. Как правило, пороговые характеристики инфракрасных детекторов при рабочей температуре (для HgCdTe обычно 80 К) ограничены шумами фонового излучения. В случае увеличения времени жизни неосновных носителей заряда в HgCdTe возможна реализация режима ограничения пороговых

характеристик шумами фонового излучения при более высоких температурах. В настоящее время матрицы на основе HgCdTe применяются почти исключительно в военных целях, поэтому важным требованием к инфракрасным детекторам является стабильность характеристик во времени, в том числе при радиационных воздействиях.

### Методы получения HgCdTe

Для производства высокоэффективных и доступных инфракрасных детекторов большое значение имеет качество используемого материала. Материал, необходимый для производства приборов с высокими характеристиками, должен удовлетворять основным требованиям:

- низкая плотность дефектов;
- большие размеры пластин;
- однородность и воспроизводимость свойств.

В результате многолетних исследований в этой области методы получения  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  эволюционировали от высокотемпературного выращивания объемных кристаллов к эпитаксиальным методам выращивания при относительно низких температурах.

При выращивании объемных структур используют в основном два типа методов: рост из расплава или пара. Большое развитие методы роста объемного материала  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  получили в промышленности. В литературе опубликованы обзоры развития объемного HgCdTe [4]. При росте объемных кристаллов используются три основные технологии:

- рекристаллизация из твердой фазы;
- метод Бриджмена;
- модифицированный метод Бриджмена с использованием движущегося нагревателя.

Выращиваемые объемные материалы HgCdTe в основном непригодны для производства фотоэлектрических приборов второго и третьего поколений из-за дефектов материала и областей высокой плотности дислокаций. В полупроводниковых приборах активная рабочая область составляет слой толщиной всего несколько микрометров. Остальная часть монокристалла является конструктивной, обеспечивающей механическую прочность создаваемого прибора. Поэтому в настоящее время при создании фотоприемных устройств используются слои, выращиваемые эпитаксиальными методами.

В последние два десятилетия происходит постоянный рост интереса к эпитаксиальным методам выращивания HgCdTe. Преимуществом эпитаксиальных методов, по сравнению с объемными, является то, что они предлагают возможность роста слоев большой площади (диаметром до 75 мм) [2]. Также значимым фактом при использовании эпи-

Сравнение тонкопленочных технологий роста HgCdTe [10]

Технология роста	Преимущества	Недостатки
Жидкофазная эпитаксия (ЖФЭ)	Высокая чистота Отработанная технология Масштабное производство	Удержание расплава (вертикальное погружение) Плохая резкость границы раздела (около 1...3 мкм) Многослойность затруднена
Парофазная эпитаксия (ПФЭ) из металлоорганических соединений	Хорошая морфология поверхности Резкая граница раздела (<1 мкм) Масштабное производство	Чистота исходных материалов Возможны неоптимальные электрические свойства Сложная подготовка подложки
Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ)	Резкая граница раздела, сверхрешетки Низкая температура роста, хорошая морфология поверхности Контроль в процессе роста	Дорогостоящее оборудование Низкая скорость роста Сложная подготовка подложки

таксиальных методов является возможность выращивания сложных слоистых структур с хорошей однородностью вдоль выращенных слоев, возможность получения резкого и сложного профиля основных и легирующих компонентов, что может быть применено для улучшения характеристик фотодетекторов. Основное применение эпитаксиальный материал находит при изготовлении современных приборов на основе гетеропереходов для инфракрасных систем третьего поколения, основанных на HgCdTe. Например, такими приборами являются двухцветные инфракрасные фотодиоды, лавинные фотодиоды и некоторые другие типы инфракрасных фотодиодов. Наиболее широко используемая подложка для эпитаксиального роста HgCdTe является CdZnTe. Эти два материала обладают очень близкими постоянными решетки, что при использовании данного вида подложек обеспечивает плотность дефектов ниже  $10^4 \text{ см}^{-2}$ . В связи с большой стоимостью CdZnTe в данное время ведутся исследования выращивания HgCdTe на альтернативных подложках [5–9], что позволяет увеличить размер пластин и значительно снижает стоимость получаемого материала.

Рост эпитаксиальных слоев происходит при низких температурах, которые делают возможным снижение собственной плотности дефектов. Низкие парциальные давления ртути приводят к отсутствию необходимости использования толстостенных ампул, при этом рост может происходить в многоразовых системах производственного типа. Выращенные эпитаксиальные слои могут быть отожжены в едином технологическом цикле при низких температурах. Эпитаксиальные слои, выращенные на прозрачных для ИК излучения подложках, обеспечивают возможность изготовления на их основе матричных фотоприемников, освещаемых со стороны подложки.

В табл. 1 представлены обобщенные сведения о преимуществах и недостатках основных промышленно применяемых эпитаксиальных технологий роста HgCdTe.

Метод молекулярно-лучевой эпитаксии предоставляет уникальные возможности для создания эпитаксиальных структур HgCdTe. Материал, выращенный данным методом, характеризуется лучшей однородностью свойств, а также, что очень важно, заранее заданными профилями легирова-

ния и состава [3]. Эти преимущества нового материала предоставляют возможности создания на его основе многоэлементных инфракрасных детекторов излучения, обеспечивающих обработку сигнала непосредственно в фокальной области. Данный материал перспективен для разработки матричных детекторов инфракрасного диапазона на основе  $p-n$ -диодов, сформированных в эпитаксиальной пленке ионной имплантацией и создает основу для создания новых поколений фотоприемных устройств.

#### Фотоприемники и фотоприемные устройства на основе твердого раствора HgCdTe

Практическое применение фотоприемных устройств в значительной степени определяются спектрами прозрачности атмосферы. Диапазон длин волн 8...14 мкм относится к дальней ИК области прозрачности земной атмосферы. Основные области применения фотоприемных устройств делятся на два класса:

- наблюдение объектов по отраженному излучению;
- наблюдение объектов по собственному тепловому излучению, определяемому их температурой.

По закону спектрального распределения излучения абсолютно черного тела максимум интенсивности излучения при комнатной температуре  $\lambda_{\text{max}} \sim 10 \text{ мкм}$ . Поэтому область спектра 8...14 мкм соответствует излучению тел, имеющих температуру, близкую к комнатной (например, живых объектов). В этой области спектра работают тепловизионные устройства разведки и обнаружения слабо нагретых тел.

Уникальные свойства полупроводникового материала HgCdTe позволяют изготавливать различные типы детекторов излучения, действующие в широком диапазоне ИК излучения (рис. 1). На основе HgCdTe производятся фоторезисторы, SPRITE-детекторы, различные виды фотодиодов (в том числе и МДП-фотодиоды) и матрицы фокальной плоскости. В работе [11] кратко рассматриваются различные элементарные приемники излучения и их общие характеристики, а также линейчатые, матричные приемники изображения и устройства систем охлаждения приемников излучения. Далее кратко рассмотрим особенности свойств различных детекторов на основе HgCdTe.

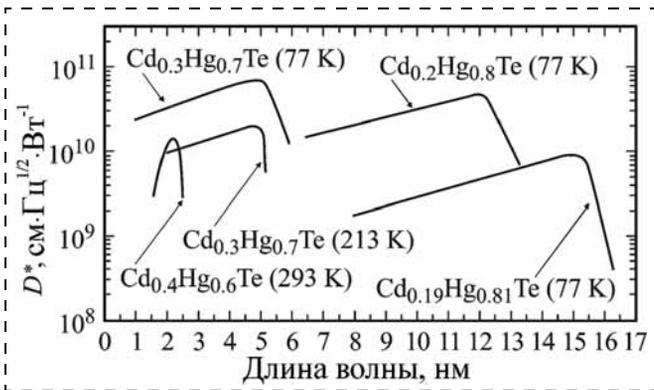


Рис. 1. Спектральное распределение обнаружительной способности фотоприемников  $D^*$  на основе соединения  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  с различным содержанием  $CdTe$  [12]

### Фоторезисторы на основе твердого раствора $HgCdTe$

Основной частью фоторезистора является слой  $HgCdTe$  толщиной 3...20 мкм с контактами. В зависимости от рабочей температуры для приемника существуют различные оптимальные толщины активной области. Обычно эти толщины составляют порядка нескольких микрометров и выбираются равными обратным величинам коэффициента оптического поглощения. При этом они имеют меньшее значение в неохлаждаемых приборах. Для получения времен жизни, ограниченных объемными процессами, необходимо снизить скорость поверхностной рекомбинации примерно до 500 см/с [13]. Это может быть получено путем достижения слабого обогащения поверхности, что будет препятствовать оттоку носителей заряда к поверхности детектора. В связи с этим для обогащения поверхности можно использовать нанесение на поверхность прибора собственного оксида, полученного анодным окислением, причем на поверхность оксида обычно наносится антиотражающее покрытие. Одним из наиболее важных этапов при изготовлении фоторезисторов является пассивация. Пассивирующее покрытие обеспечивает герметизацию полупроводника и стабилизацию его химических свойств. Поперечное сечение типичного  $HgCdTe$  фоторезистора приведено на рис. 2.

Технологические операции для производства фоторезисторов на основе объемного  $HgCdTe$  описаны в работе [14]. Технология производства фоторезисторов на основе эпитаксиальных слоев проще по сравнению с производством на основе

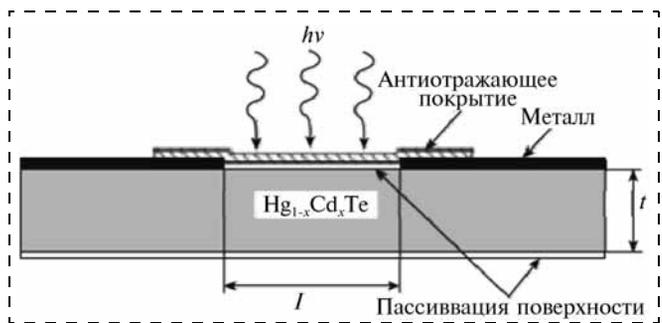


Рис. 2. Типичная структура  $HgCdTe$  фоторезистора [1]:  $h\nu$  — падающие фотоны;  $l$  — ширина окна;  $t$  — толщина слоя

объемного материала, так как не требует технологических операций утончения полупроводникового слоя и подготовки тыловой стороны. Для улучшения ситуации с теплоотводом при производстве фотодиодов на основе эпитаксиальных слоев лучше использовать слои, выращенные на материалах с хорошей теплопроводностью. Такими материалами являются кремний, сапфир и GaAs.

Коммерческие варианты фоторезисторов  $HgCdTe$  обычно производятся в виде квадрата с размером активной области от 25 мкм до 4 мм. Длина фоторезисторов, используемых в системах тепловидения с высоким разрешением ( $\approx 50$  мкм) обычно меньше, чем длина диффузии неосновных носителей заряда и дрейфовая длина в охлажденном

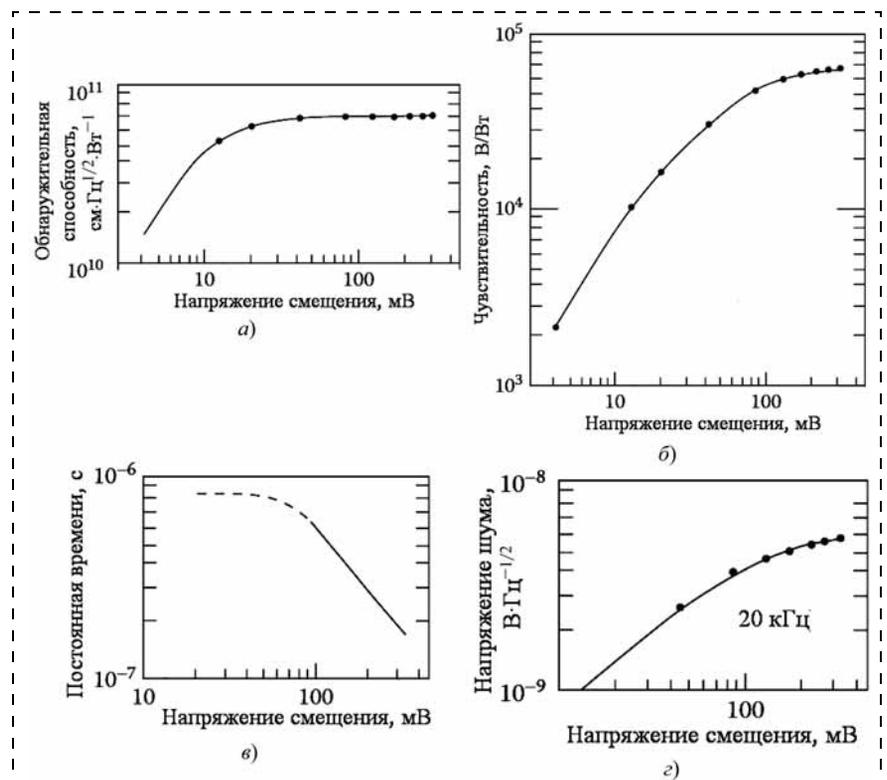


Рис. 3. Зависимости от напряжения обнаружительной способности (а), чувствительности (б), постоянной времени (в), напряжения шума (г) фоторезистора с толщиной 50 мкм на основе  $HgCdTe$ , работающего при 80 К. Измерения проводились при угле поля зрения  $30^\circ$ , а значения чувствительности приведены к максимальному значению отклика на длине волны 12 мкм [13]

HgCdTe. Это приводит к уменьшению фотоэлектрического усиления из-за диффузии и дрейфа фотогенерированных носителей заряда к контактным областям. Поведение типичного детектора, показывающего насыщение чувствительности, представлено на рис. 3.

Основным производителем фоторезисторов на основе HgCdTe в России является ОАО "Московский завод "Сапфир". Данное предприятие выпускает линейки фоторезисторов, чувствительных в спектральном диапазоне 8...12 мкм с числом элементов  $2 \times 10$  и  $2 \times 16$  (размер элемента  $0,05 \times 0,05$  мм) [15]. Максимальная чувствительность приборов приходится на длину волны 11,5 мкм. Обнаружительная способность  $\geq 4 \cdot 10^{10}$  см  $\cdot$  Гц<sup>1/2</sup>  $\cdot$  Вт<sup>-1</sup>, а чувствительность  $\geq 3 \cdot 10^4$  В  $\cdot$  Вт<sup>-1</sup>. Рабочая температура данных линеек составляет 80 К. Также предприятие может изготавливать на заказ одно- и двухрядные линейчатые приемники с числом элементов до 128 шт. в ряд и одно- и двухрядные линейки с числом элементов 200 шт.

### Фотодиоды на основе твердого раствора HgCdTe

Разработка фотодиодов на основе HgCdTe первоначально определялась их применением в качестве быстродействующих детекторов по причине небольшой емкости перехода. Фотодиоды обладают очень низкой мощностью рассеяния и могут быть собраны в двумерные матрицы, содержащие большое число элементов, ограниченное лишь возможностями существующих технологий. Сначала фотодиоды изготавливались на основе объемного материала, в дальнейшем разработки детекторов были связаны с развитием эпитаксиальных методов роста. Легирование в процессе выращивания дает возможность получить многослойные структуры с высокими параметрами.

В работе [16] сообщается о выращивании из металлоорганической паровой фазы длинноволновых HgCdTe гетероструктур на подложке из кремния (100). На основе этих гетероструктур были созданы тестовые диоды. На основании проведенных исследований вольт-амперных характеристик диодов на противоположных сторонах матрицы авторы публикации делают вывод о том, что на основе этих материалов может быть создана очень одно- и двумерная длинноволновая ИК матрица.

Как и при создании фоторезисторов, пассивация играет важную роль в технологии создания фотодиодов на основе HgCdTe. От качества пассивирующего покрытия зависит ток поверхностной утечки и температурная стабильность приемника, поэтому многие производители, как например [17], патентуют свою технологию пассивации. Так как в случае с фотодиодами, одно и то же покрытие должно стабилизировать одновременно области *n*- и *p*-типа проводимости, то пассивация фотодиодов является более трудной задачей в сравнении с фоторезисторами. Анодное окисление не пригодно

для пассивации областей *p*-типа, так как оно приводит к формированию инверсионных слоев. Обычно для пассивации фотодиодов применяют слои ZnS, CdS, фториды SiO<sub>x</sub> и SiN<sub>x</sub>. В последнее время особое внимание отдается пассивации с использованием CdTe, CdZnTe и гетеропереходной пассивации [18]. Нанесение слоев проводят напылением, распылением электронным пучком, а также выращивают с помощью эпитаксиальных методов. Приборы с широкозонными поверхностными слоями успешно пассивируются собственным оксидом [19]. На поверхность пассивирующих слоев CdTe и Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te с более широкой запрещенной зоной часто наносят SiO<sub>x</sub>, SiN<sub>x</sub> и ZnS.

На рис. 4 представлен схематический профиль зонной диаграммы наиболее часто используемого несмещенного гомо- (*n*<sup>+</sup>—*p*) и гетероперехода (*p*—*n*) фотодиодов. Во избежание вклада тунельного тока концентрация легирующей примеси в области базы должна быть ниже  $10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Освещенные с фронтальной стороны *n*<sup>+</sup>—*p*-фотодиоды показывают высокую квантовую эффективность. Благодаря эффекту "окна", вызванному эффектом Мосса—Бурштейна в сильно легированном *n*<sup>+</sup>-слое, излучение поглощается в обедненной области или вблизи нее. При освещении с обратной стороны *n*<sup>+</sup>—*p*-фотодиод может также показывать высокую квантовую эффективность при условии, что толщина базового слоя мала по сравнению с диффузионной длиной.

Контактное сопротивление, контактная поверхностная рекомбинация, контактный 1/*f* шум, долговечность и термостабильность приборов — это основные проблемы, связанные с контактами в фотодиодах. В течение многих лет индий остается важнейшим металлом для *n*-Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te [20, 21], вместе с тем золото может использоваться для материалов как *p*-типа, так и для *n*-типа [22].

Рис. 5 показывает высокие измеряемые значения  $R_0A$  ( $R_0$  — дифференциальное сопротивление при нулевом смещении,  $A$  — площадь чувствительного элемента) фотодиодов HgCdTe в зависимости от длины волны при различных температурах [23]. Непрерывными линиями показаны теоретически рассчитанные с использованием одномерной модели в предположении ограничения диффузией носителей заряда из более узкозонной *n*-области, и рекомбинации неосновных носителей через Оже и излучательный процесс.

Фотодиоды HgCdTe компании Teledyne показывают характеристики, близкие к теоретическим, для различных материалов при различных температурах. Среднее значение  $R_0A$  при 77 К для фотодиодов HgCdTe с длиной волны отсечки 10 мкм составляет около 1000 Ом  $\cdot$  см<sup>2</sup> и уменьшается до 200 Ом  $\cdot$  см<sup>2</sup> на длине волны 12 мкм. При 40 К  $R_0A$  находится в диапазоне от  $10^6$  до  $10^8$  Ом  $\cdot$  см<sup>2</sup> при 12 мкм.

В настоящее время НПО "Орион" выпускает малозлементные фотодиоды на основе твердого раство-

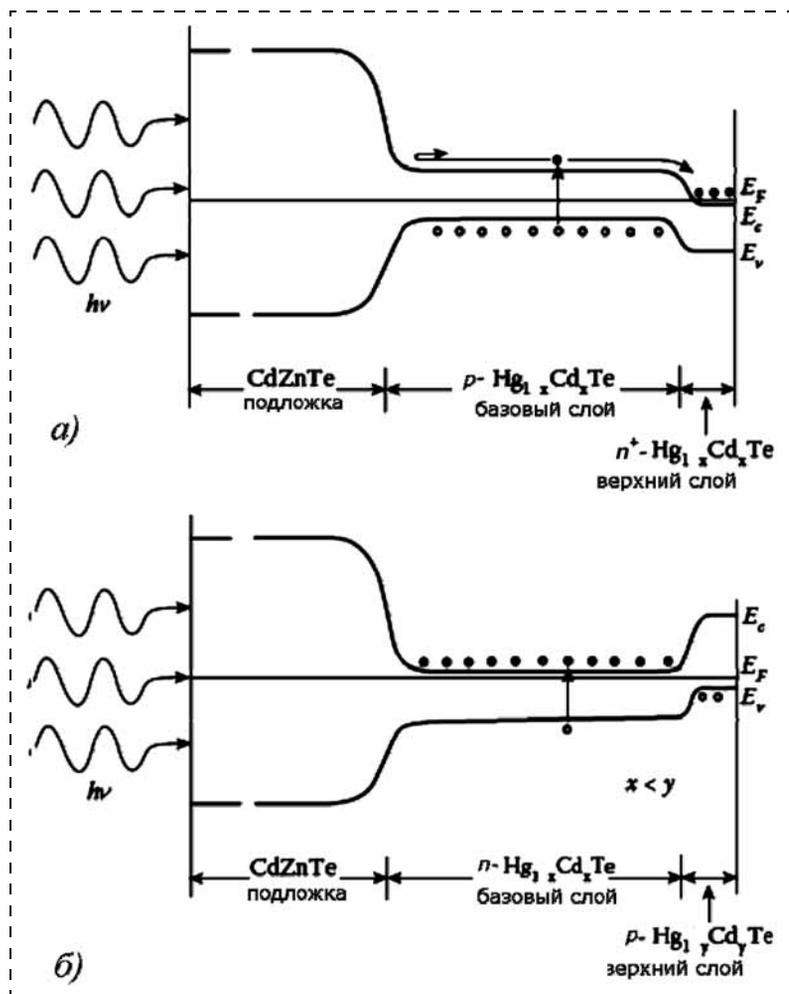


Рис. 4. Схематический профиль зонной диаграммы:  
 а — ( $n^+ - p$ )- и б — ( $p - n$ )-гетеропереходов фотодиодов [14]:  
 $E_c$  — зона проводимости;  $E_v$  — валентная зона;  $E_f$  — уровень Ферми

ра  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  с числом элементов 1 и 4 шт. с размерами элемента до  $1,0 \times 1,0$  и  $0,1 \times 0,1$  мм соответственно [24]. Также имеется возможность изготовле-

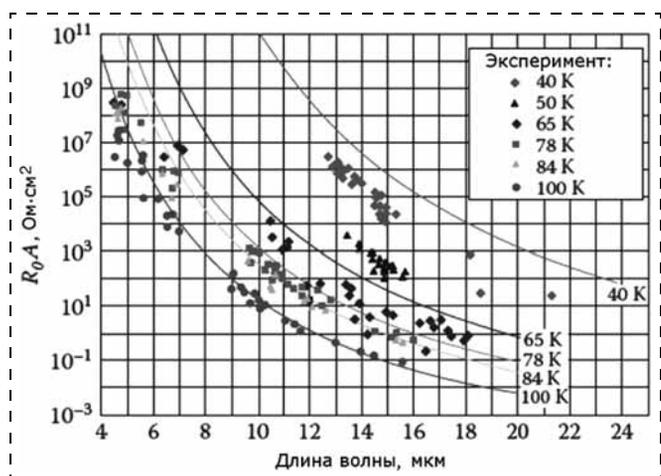


Рис. 5. Зависимость  $R_0A$  в зависимости от длины волны отсечки для Teledyne (ранее Rockwell Scientific)  $p - n$   $HgCdTe$  фотодиодов. Данные, измеренные при различных температурах, сравниваются с теоретической одномерной диффузионной моделью [23]

ния приемников "под заказ" с другим числом элементов и размером фоточувствительного элемента. Оба приемника рассчитаны на диапазон спектральной чувствительности 8...12 мкм и обладают удельной обнаружительной способностью не менее  $3 \cdot 10^{10}$  см · Гц<sup>1/2</sup>/Вт. Фотоприемники могут быть опционально укомплектованы предусилителями. Токовая чувствительность 5 А/Вт. Рабочая температура для данных приемников составляет 80 К. Постоянная времени не более 40 и 10 нс для фотодиодов с числом элементов 1 и 4 соответственно.

НПО "Орион" производит два типа многоядных фотоприемных устройств на основе теллурида кадмия-ртути: ФУК2М и ФУК4М. Данные многоядные фотоприемные устройства предназначены для комплектации сканирующих тепловизионных систем, используемых в различных отраслях промышленности для нужд геологии, медицины, пожарной охраны, экологического контроля и контроля утечек теплоты. Фотоприемные устройства обеспечивают детектирование ИК излучения, режим временной задержки и накопления сигнала, усиление и мультиплексирование сигнала. Использование режима временной задержки и накопления сигналов существенно повышает температурную чувствительность и пространственное разрешение контрольно-измерительной аппаратуры. Охлаждение до рабочей температуры 80 К осуществляется микрокриогенной системой (МКС) на газовой криогенной машине типа Сплит—Стирлинг или микротеплообменником Джоуля—Томсона.

Основные технические характеристики данных многоядных фотоприемных устройств приведены в табл. 2.

Таблица 2  
 Основные технические характеристики многоядных фотоприемных устройств [24]

Многорядное фотоприемное устройство	ФУК2М	ФУК4М
Формат	2×256	2×96
Шаг чувствительных элементов поперек сканирования, мкм	35	30
Шаг чувствительных элементов вдоль сканирования, мкм	35	30
Диапазон спектральной чувствительности, мкм	7,5...11	7,5...11
Удельная обнаружительная способность, см · Гц <sup>1/2</sup> /Вт, не менее	$7 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^{10}$
Время накопления, мкс	0...25	0...50
Число выходов	4	4
Максимальная тактовая частота, МГц	7,5	7,5
Динамический диапазон выходных сигналов, дБ, не менее	60	60
Масса, г, не более	400	400

## МДП-структуры на основе твердого раствора HgCdTe

Большой интерес представляют МДП-структуры на основе HgCdTe в связи с возможностью использования их в монокристаллических и гибридных матрицах фокальной плоскости [25]. Около двух десятков лет технологи стремились развить полностью монокристаллические ПЗС на основе HgCdTe для приема ИК излучения. Трудности, связанные с формированием стабильного  $p^+ - n$ -перехода, привели к разработке  $n$ -канальных ПЗС. Применение материала  $p$ -типа позволило изготовить стабильный диод методом ионной имплантации, что обеспечило разработку МДП-транзисторов, с появлением которых стало возможным создание усилителей из HgCdTe. Все это послужило созданию полностью монокристаллических ПЗС на основе HgCdTe [26]. Также можно отметить, что большое число исследований свойств поверхности и границ раздела проводится с помощью МДП-структур [27].

Основным фактором, ограничивающим эффективность переноса заряда при низких частотах, является захват заряда на быстрые поверхностные состояния [25]. Поэтому важной задачей при создании ПЗС матриц является минимизация плотности быстрых состояний. Эффективность передачи на высоких частотах резко снижается из-за ограничения времени, отведенного на перенос заряда между смежными ямами. Увеличение частоты работы прибора может быть достигнуто путем снижения длины затвора и максимального повышения напряжения на нем.

## Матричные фотоприемные устройства ИК диапазона на основе твердого раствора HgCdTe

Матричные фотоприемные устройства ИК диапазона широко используются во многих областях: в науке, медицине и в военной технике. Классификация, общие принципы построения матричных ИК фотоприемников и особенности их применения в различных сферах науки и техники приведены в монографиях [28, 29]. В [28] также рассматриваются вопросы, связанные с улучшением качества получаемого изображения путем применения различных схем считывания и последующей обработки сигнала. Вопросам повышения качества изображения тепловизоров на основе матричных HgCdTe фотоприемных устройств ИК диапазона за счет коррекции неоднородности чувствительности элементов приемника, поиску и устранению его дефектных элементов посвящена работа [30]. В работе также рассматриваются применение системы цифровых фильтров для устранения артефактов изображения.

Основные преимущества ИК матриц фокальной плоскости в сравнении с дискретными приборами связаны с полным отсутствием механического

сканирования и увеличением чувствительности за счет большого времени интегрирования. В основном матрицы фокальной плоскости на основе материала HgCdTe используют фотовольтаический эффект. Фотодиоды имеют некоторые преимущества над фотопроводящими детекторами, особенно в средне- и длинноволновой ИК областях, а именно: незначительный шум  $1/f$ , более плотное расположение элементов в матрице, лучшую линейность и др. Использование фотопроводящих детекторов продолжается в некоторых приборах, имеющих относительно малое число элементов, а также в случае приема сверхдлинноволнового излучения.

ИК матрицы фокальной плоскости на основе HgCdTe изготавливаются в виде гибридных и монокристаллических матриц фокальной плоскости. Стыковка матриц на основе HgCdTe, обладающих высокими рабочими характеристиками, с хорошо разработанными кремниевыми интегральными микросхемами позволяет получать приборы хорошего качества для тепловизионных систем с тепловым и пространственным разрешением. Для гибридизации матриц используют метод петледырочных соединений и технологию индиевых столбов.

Технологию петледырочных соединений для HgCdTe разработали Baker с соавторами [31]. Она состоит из двух этапов. На первом этапе создается пленка фоторезиста с матрицей отверстий. Затем ионным травлением удаляется HgCdTe из отверстий до тех пор, пока не обнаруживаются алюминиевые контактные площадки. Отверстия заполняются проводником для формирования соединения между HgCdTe и подстилающей контактной площадкой мультиплексора. Переход формируется вокруг отверстия в момент ионного травления. Второй этап включает создание контакта к  $p$ -типу.

Метод индиевых столбов позволяет легко достигать высокого коэффициента оптического заполнения. Первоначально (на объемном HgCdTe) после гибридного соединения матриц ширина пластины HgCdTe уменьшалась до 10 мкм для достижения оптимального поглощения излучения в области перехода и увеличения  $R_0A$  за счет уменьшения диффузионного объема. Детекторы, освещаемые с обратной стороны, изготавливаются из эпитаксиальных пленок HgCdTe на прозрачных подложках [32]. При этом уменьшение толщины материала после гибридизации не требуется, и высокое качество эпитаксиальных пленок, по сравнению с объемными кристаллами, является дополнительным преимуществом этого подхода. Все это позволяет получить высокий процент выхода годных структур и превосходную надежность детекторов.

В настоящее время в НПО "Орион" разработаны технологии промышленного производства ряда матриц из HgCdTe форматов  $2 \times 96$ ,  $2 \times 256$ ,  $4 \times 288$ ,  $256 \times 256$ ,  $320 \times 256$ ,  $384 \times 288$  (а также кремниевых мультиплексоров к ним), на стадии

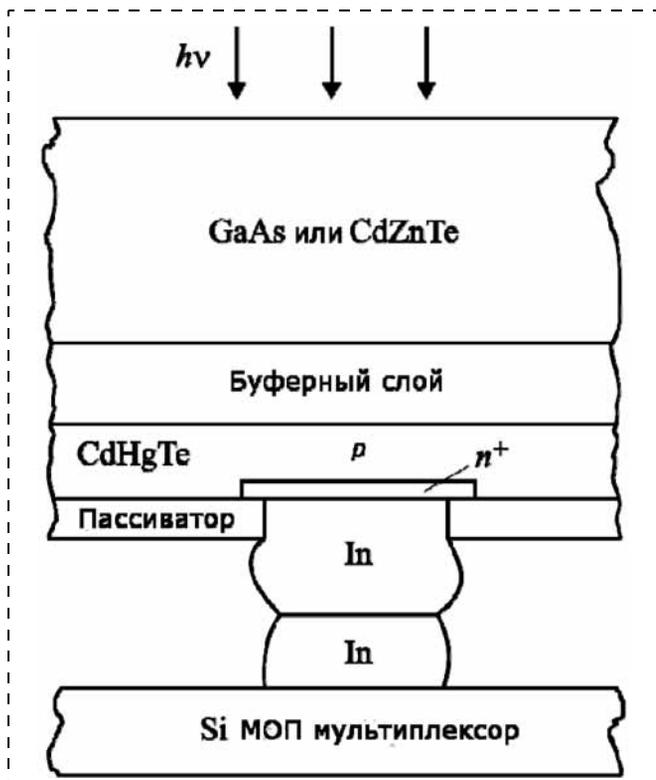


Рис. 6. Структура фоточувствительного элемента матрицы [12]

разработки находятся матрицы больших форматов, например  $768 \times 576$  [3]. Данные матрицы промышленного производства используются для изготовления модулей формирования телевизионного сигнала, предназначенных для визуализации тепловых полей. Например, матричное фотоприемное устройство на основе HgCdTe ФУК10М предназначено для использования в высокочувствительных тепловизионных и тепловизионных системах "смотрящего" типа с повышенным разрешением для спецприменений, медицины, геологоразведки, метеорологического и экологического мониторинга, сельского хозяйства и т. п. Охлаждение до рабочей температуры 80 К осуществляется на газовой криогенной машине типа интегральный Стирлинг.

В НПО "Орион" матрицы фоточувствительных элементов стыкуются с помощью индиевых микроконтактов с кремниевой микросхемой мультиплексора. На рис. 6 показана структура фоточувствительного элемента.

Принимаемое излучение падает через прозрачную и просветленную подложку эпитаксиального слоя и поступает в активный слой HgCdTe.

В табл. 3 приведены основные характеристики матричных фотоприемных устройств (МФПУ) и модулей формирования телевизионного сигнала (МФТВ) из HgCdTe для тепловидения и тепловизионной в спектральном диапазоне 8...13 мкм. Подробная информация о производимой продукции предприятия приводится на сайте предприятия [24].

Выпускаемые в НПО "Орион" матричные и многорядные МФПУ обладают хорошей обнаружительной способностью. Обнаружительная способность матричных МФПУ колеблется в пределах от 3 до  $5 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2}/\text{Вт}$ , а многорядных  $\geq 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2}/\text{Вт}$  [12].

Монолитные матрицы фокальной плоскости обладают важными преимуществами, связанными с отсутствием проблем совмещения различных материалов для схем считывания и матриц детекторов. Одним из них является устранение потерь инжекции заряда как при детектировании сигнала, так и при его интегрировании. Современные монолитные матрицы фокальной плоскости на основе HgCdTe определяются МДП-устройствами переноса заряда и их способностью детектировать ИК излучение, накапливать и управлять фотогенерированным зарядом. Снижение рабочих характеристик при использовании узкозонного HgCdTe происходит из-за ограниченной эффективности переноса заряда и высоких темновых токов.

В России в настоящее время в Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (г. Новосибирск) идет разработка элементов технологии монолитного ИК фотоприемника на основе HgCdTe, созданного методом молекулярно-лучевой эпитаксии. В работе [34] предложена технология ИК детекторов, основанная на монолитных интегрированных ИК матрицах фокальной плоскости. На рис. 7 изображена схема фоточувствительного элемента монолитного матричного фотоприемника, который создается путем выращивания методом молекулярно-лучевой эпитаксии слоев HgCdTe в специально отведенных для этого участках на поверхности мультиплексора. Полученные в работе результаты показывают принципиальную возмож-

Таблица 3

Матричные МФПУ и МФТВ, выпускаемые НПО "Орион" [33]

Тип, формат	Спектральный диапазон, мкм	Средняя обнаружительная способность, $\text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}/\text{Вт}$	Эквивалентная шуму разность температур, мК	Максимальная частота выходного сигнала, МГц	Кадровая частота, Гц
МФПУ $4 \times 288$	8...10,3	$\geq 10^{11}$	$\leq 20$	7,5	—
МФПУ $256 \times 256$		$\geq 4 \times 10^{10}$	$\leq 40$	4,0	50
МФТВ $256 \times 256$		—	$\leq 40$	—	50
МФПУ $384 \times 288$		$\geq 4 \times 10^{10}$	$\leq 40$	4,0	50

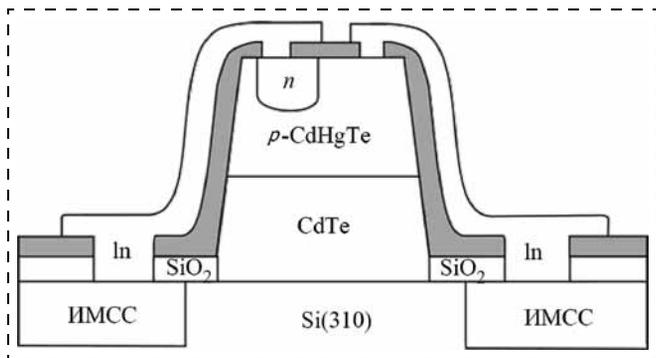


Рис. 7. Схема фоточувствительного элемента монолитного матричного фотоприемника [34]

ность монолитного интегрирования ИК матриц фокальной плоскости на основе HgCdTe на кремниевую считывающую интегральную схему. В работе [35] сообщается о создании монолитного фотоприемного модуля на основе HgCdTe формата  $32 \times 32$ .

ПЗИ и матрицы зарядового изображения являются промежуточными конструкциями между монолитными и гибридными технологиями. Накопление заряда здесь происходит в узкозонном полупроводнике, а мультиплексирование и предусиление — в кремниевом чипе. ПЗИ используются в смотрящих матрицах фокальной плоскости для диапазонов 3...5 и 8...14 мкм.

Матрица зарядового изображения — это один из вариантов технологии изготовления приборов с зарядовой инжекцией. Данные устройства первоначально разработаны Texas Instruments для потоков излучения с высокой плотностью диапазонов 3...5 и 8...14 мкм для сканирующих систем [36]. Приборы представляют собой двумерную матрицу МДП-конденсаторов, которые могут осуществлять адресацию строки, используя переключатель на чипе.

Интересным направлением разработок является применение быстродействующих фотоприемных устройств для создания 3D-изображений. Построение тепловизионных 3D-изображений в настоящее время связывается с процессом цифровой

обработки 2D-изображения при внесении в него дополнительной информации о наблюдаемом объекте, в большинстве случаев это сведения о расстоянии до отдельных фрагментов объекта [33]. Эти данные могут быть получены при регистрации монохроматического излучения, отраженного от объекта при его подсветке импульсным лазером. Такие системы должны иметь малую инерционность и достаточную пороговую чувствительность. Для создания матричных детекторов  $N \times N$  в системах 3D-изображений на основе соединений HgCdTe в основном используют фотодиоды со структурой  $n^+ - n^- - p$  планарного типа либо изготовленные по технологии "с вертикальными стенками" (рис. 8) [33].

Результаты экспериментальных измерений, представленные в литературе, указывают на сильную зависимость параметров таких фотоприемников от нанесенных пассивирующих диэлектрических покрытий. Поэтому задача исследования границ раздела полупроводник/защитный диэлектрик является актуальной и по сей день.

### Заключение

В настоящее время широко производятся дискретные и матричные фотоприемники на основе HgCdTe для спектрального диапазона 8,0...14,0 мкм. Лидерами в области разработки и производства современных матриц на основе HgCdTe является фирма Raytheon (США) (более 60 % мирового рынка сканирующих и смотрящих матриц 2-го поколения на основе HgCdTe), а также фирмы Sofradir (Франция), Rockwell Scientific, Fujitsu. Основными производителями ИК приемников на основе HgCdTe в России являются ФГУП "НПО "Орион"", ОАО "Московский завод "Сапфир"", ФГУП "Альфа". Технология молекулярно-лучевой эпитаксии HgCdTe активно развивается в ИФП СО РАН (г. Новосибирск).

Уникальные свойства полупроводникового материала HgCdTe позволяют изготавливать различные типы детекторов излучения, действующих в широком

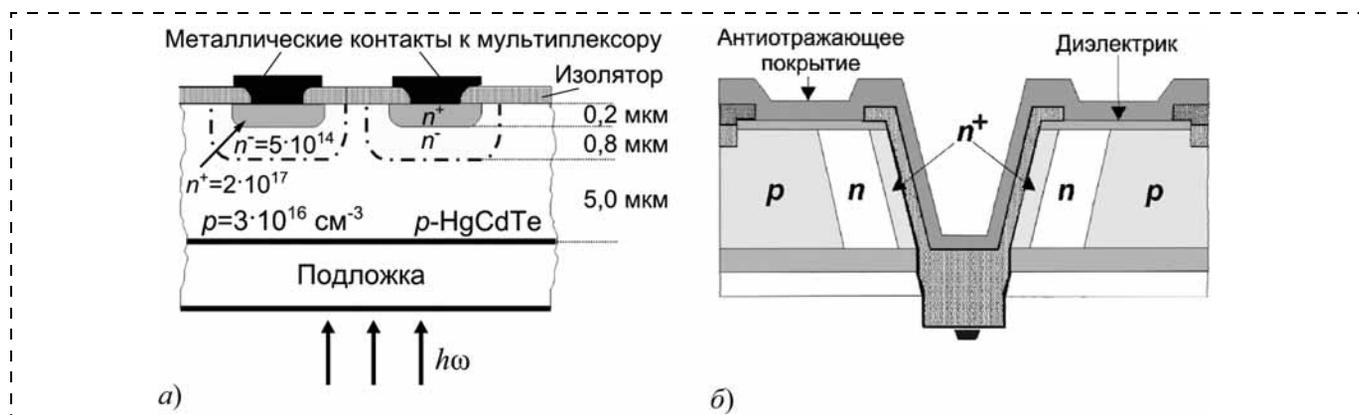


Рис. 8. Фотодиод со структурой планарного типа (а), фотодиод, изготовленный по технологии "с вертикальными стенками" (б) [33]

диапазоне ИК излучения. На основе HgCdTe производятся фоторезисторы, SPRITE-детекторы, различные виды фотодиодов (в том числе и МДП-фотодиоды) и матрицы фокальной плоскости.

*Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашения 14.B37.21.0074 и 14.B37.21.1177, Госконтракт № 14.514.11.4050.*

### Список литературы

1. Rogalsky A. Infrared detectors. 2nd. ed. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011. 876 p.
2. Овсяк В. Н., Курьшев Г. Л., Сидоров Ю. Г. и др. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. Новосибирск: Наука, 2001. 376 с.
3. Гринченко Л. Я., Пономаренко В. П., Филачев А. М. Современное состояние и перспективы инфракрасной фотоэлектроники // Прикладная физика. 2009. № 2. С. 57—64.
4. Maier H., Hesse J. Growth, properties and applications of narrow-gap semiconductors / Ed. by H. C. Freyhardt // Crystal Growth, Properties and Applications. Berlin: Springer Verlag, 1980. P. 145—219.
5. Tennant W. E. Recent development in HgCdTe photovoltaic device grown on alternative substrates using heteroepitaxy // Tech. Digest IEDM. 1983. Vol. 29. P. 704—706.
6. Sidorov Yu. G., Dvoretzky S. A., Varavin V. S. et al. Molecular Beam Epitaxy of MCT Solid Solution on Alternative Substrate // Semiconductor structures, Interfaces and Surfaces. 2001. Vol. 35, N 9. P. 1045—1053.
7. Гузев А. А., Варавин В. С., Дворецкий С. А., Ковчачев А. П., Курьшев Г. Л., Ли И. И., Панова З. В., Сидоров Ю. Г., Якушев М. В. Фоточувствительные свойства структур ZnTe/CdTe/HgCdTe // Прикладная физика. 2009. № 2. С. 92—96.
8. Якушев М. В., Брунев Д. В., Варавин В. С., Дворецкий С. А., Предин А. В., Сабинина И. В., Сидоров Ю. Г., Сорочкин А. В., Сусяков А. О. Гетероструктуры HgCdTe на подложках Si(310) для инфракрасных фотоприемников // Автоматика. 2009. Т. 45, № 4. С. 23—31.
9. He L., Chen L., Wu Y., Fu X. L., Wang Y. Z., Wu J., Yu M. F., Yang J. R., Ding R. J., Hu X. N., Li Y. J., Zhang Q. Y. MBE HgCdTe on Si and GaAs substrates // Journal of Crystal Growth. 2007. Vol. 301—302. P. 268—272.
10. Rogalski A., Adamiec K., Rutkowski J. Narrow-Gap Semiconductor Photodiodes. Bellingham, WA: SPIE — The International Society for Optical Engineering, 2000. P. 438.
11. Формозов Б. Н. Аэрокосмические фотоприемные устройства в видимом и ИК-диапазонах: учеб. пособие. СПб.: СПбГУАП, 2002. 120 с.
12. Стафеев В. И., Болгарь К. О., Бурлаков И. Д. и др. Матричные фотоприемные устройства среднего и дальнего инфракрасных диапазонов спектра на основе фотодиодов из  $Cd_xHg_{1-x}Te$  // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39. Вып. 10. С. 1257—1265.
13. Elliott C. T., Gordon N. T. Infrared detectors / Ed. by C. Hilsun // Handbook on Semiconductors. Amsterdam: North-Holland, 1993. Vol. 4. P. 841—936.
14. Piotrowski J.  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  detectors / Ed. by A. Rogalski // Infrared photon Detectors. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1995. P. 391—493.
15. Охлаждаемые ИК фотоприемники с микротеплообменником Джоуля-Томсона — ОАО "Московский завод "Сапфир" [Электронный ресурс] / Охлаждаемые ИК фотоприемники с микротеплообменником Джоуля-Томсона. URL: [http://www.mzsapfir.ru/viewpage.php?page\\_id=12](http://www.mzsapfir.ru/viewpage.php?page_id=12).
16. Hall D. J., Buckle L., Gordon N. T. and etc. High-performance long-wavelength HgCdTe infrared detectors grown on silicon substrates // Applied physics letters. 2004. Vol. 85, N 11. P. 2113—2116.
17. Nemirovsky Y., Bahir G. Passivation of mercury cadmium telluride surfaces // Vac. Sci. Technol. 1989. Vol. A7. P. 450—459.
18. Zimmermann P. H., Reine M. B., Spignese K., Maschhoff K., Schirripa J. Surface passivation of HgCdTe photodiodes // J. Vac. Sci. Technol. 1990. Vol. A8. P. 1182—1184.
19. Bubulac L. O., Edwall D. D., McConnel D., DeWames R. E., Blazewski E. R., Gertner E. R. P-on-n arsenic activated junction in MOCVD LWIR HgCdTe/GaAs // Semicond. Sci. Technol. 1990. Vol. 5. N 3S. P. S45—S48.
20. Reine M. B., Sood A. K., Tredwell T. J. Photovoltaic infrared detectors / Ed. by R. K. Willardson and A. C. Beer. // Semiconductors and Semimetals. New York: Academic press, 1981. Vol. 18. P. 201—311.
21. Rogalski A., Piotrowski J. Intrinsic infrared detectors // Prog. Quant. Electr. 1988. Vol. 12. Issues 2—3. P. 87—289.
22. Byrne C. F., Knowles P. Infrared photodiodes formed in mercury cadmium telluride grown by MOCVD // Semicond. Sci. Technol. 1988. Vol. 3. P. 377—381.
23. Chuh T. Recent Developments in Infrared and Visible Imaging for Astronomy, Defense and Homeland Security // Proceedings of SPIE. 2004. Vol. 5563. P. 19—34.
24. Орион [Электронный ресурс] / Федеральное Государственное Унитарное Предприятие "НПО "ОРИОН" Государственный Научный Центр Российской Федерации. Продукция. URL: <http://www.orion-ir.ru/product.html>.
25. Kinch M. A. Metal-insulator-semiconductor infrared detectors // Semiconductors and Semimetals. 1981. Vol. 18. P. 313—385.
26. Wadsworth M. V., Borrello S. R., Dodge J., Gooh R., McCardell W., Nado G., Shihaneck M. D. Monolithic CCD imagers in HgCdTe // IEEE Trans. Electron Devices. 1995. Vol. 42. P. 244—250.
27. Овсяк В. Н., Ярцев А. В. Исследование вольт-фарядных характеристик МДП-структур на основе МЛЭ HgCdTe *n*- и *p*-типа // Прикладная физика. 2007. № 5. С. 80—83.
28. Тарасов В. В., Якушенок Ю. Г. Инфракрасные системы "смотрящего" типа. М.: Логос, 2004.
29. Тарасов В. В., Якушенок Ю. Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. М.: Университетская книга, Логос, 2007. 192 с.
30. Кремис И. И. Повышение качества изображения тепловизоров на основе матричных HgCdTe фотоприемных устройств ИК-диапазона // Прикладная физика. 2010. № 1. С. 108—114.
31. Baker I. M., Ballingall R. A. Photovoltaic CdHgTe — silicon hybrid focal planes // Proc. SPIE. 1984. Vol. 510. P. 121—129.
32. Новоселов А. Р., Косулина И. Г., Клименко А. Г., Паулиш А. Г., Васильев В. В. Индиевые столбы для FLIP-CHIP технологии матричных фотоприемных устройств на основе пленок Cd—Hg—Te, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Материалы электронной техники. 2008. № 3. С. 60—63.
33. Корнеева М. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М. Современное состояние и новые направления полупроводниковой ИК-фотоэлектроники. Часть 1 // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 47—60.
34. Якушев М. В., Васильев В. В., Дворецкий С. А., Захарьяш Т. И., Козлов А. И., Сидоров Ю. Г., Фомин Б. И., Асеев А. Л., Виноградов А. В., Дегтярев Е. В. Разработка элементов технологии монолитного инфракрасного фотоприемника // Прикладная физика. 2009. № 2. С. 120—126.
35. Сорочкин А. В., Дворецкий С. А., Козлов А. И., Предин А. В., Сабинина И. В., Сидоров Ю. Г., Фомин Б. И., Якушев М. В. Монолитный фотоприемный модуль  $32 \times 32$  // XXI Междунар. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Тез. докл. Москва. 25—28 мая. 2010 г.
36. Morris H. B., Borrello S. R., Simmons A., Schiebel R. A. Infrared Sensing Charge Imaging Matrix // Technical Digest of the International Electron Devices Meeting. 1982. P. 153.

**Н. В. Масальский**, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва, e-mail: volkov@niisi.ras.ru

## ХАРАКТЕРИСТИКИ СУБМИКРОННОГО ФОТОННОГО ФАЗОВОГО МОДУЛЯТОРА НА СТРУКТУРЕ "КРЕМНИЙ НА ИЗОЛЯТОРЕ"

Поступила в редакцию 15.03.2013

*Обсуждается перспективный подход для реализации широкополосной оптической модуляции. На основе численных решений исследованы фазовые модуляционные характеристики фотонных модуляторов, выполненных на базе техпроцесса "кремний на изоляторе". Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными. На основе численных расчетов показано, что достижимая полоса модуляции составляет более 100 ГГц.*

**Ключевые слова:** кремниевая нанофотоника, волноводная КНИ-структура, широкополосная фазовая модуляция

### Введение

Реализация широкополосной оптической модуляции является одной из приоритетных задач современных информационных систем. В практическом плане широкополосная модуляция может осуществляться при использовании оптоэлектронного устройства, выполненного на базе КНИ (кремний на изоляторе) структуры, которое встроено в волноводный интерферометр Маха—Цендера [1, 3, 4]. Основным компонентом интерферометра является кремниевый фазовый модулятор, где приложенное к нему напряжение вызывает изменение показателя преломления волновода, когда в присутствии свободных зарядов оптические свойства волновода модифицируются в результате дисперсионного эффекта, связанного со свободными плазмонами [5]. В зависимости от выполняемой функции фазовый модулятор может встраиваться в одно или в оба плеча интерферометра. При этом модулятор определяет основные характеристики интерферометра, такие как глубина и полоса модуляции, потребляемая мощность, габаритные размеры и масса [4].

Технология КНИ обладает высоким потенциалом для производства коммерчески доступных фотонных интегральных схем и оптоэлектронных устройств [3]. Одно из неоспоримых преимуществ данной технологии — ее полная совместимость с технологией КМОП [1, 2]. Подложка КНИ имеет приоритетное значение для интегральных опто-

электронных схем с широкомасштабной возможностью интеграции оптических и электронных функций на однокристалльном чипе.

Совместное применение технологий КНИ и КМОП открывает возможность реализации высокоэффективной широкополосной оптической модуляции. На основе компьютерного моделирования в данной работе исследуются методы масштабирования параметров фазовых фотонных КНИ-модуляторов, которые потенциально позволят реализовать высокоэффективную фазовую модуляцию с полосой модуляции порядка 100 ГГц.

### Модуляционные характеристики фазового КНИ-модулятора

Базовая структурная схема фазового КНИ-модулятора представлена на рис. 1 [1, 3]. КНИ-структуры представляют собой слой кристаллического кремния Si *n*-типа 1, отделенный от кремниевой подложки 2 слоем диэлектрика 3. В качестве разделительного диэлектрика чаще всего используют двуоксид кремния SiO<sub>2</sub>. На рабочей области 1 с толщиной  $H_0$  расположена в форме ребра с высотой  $h$  и шириной  $W$  область 4 поликристаллического кремния *p*-типа. Эти два элемента (1 и 4) формируют гребенчатый оптический волновод (его максимальная высота  $H = H_0 + h$ ), по которому вдоль оси  $z$  распространяется оптический пучок с характерным распределением поля 5 в ортогональной плоскости волновода  $xy$ . Между компонентами 1 и 4 расположен затвор 6 из тонкого слоя оксида кремния толщиной  $t_{ox}$ , которая составляет несколько нанометров. Оксидные элементы 7 по обе стороны от ребра поддерживают горизонтальное оптическое ограничение и препятствуют тому, чтобы оптическое поле проникло в металлические контактные площадки 8. Вертикальное оптическое

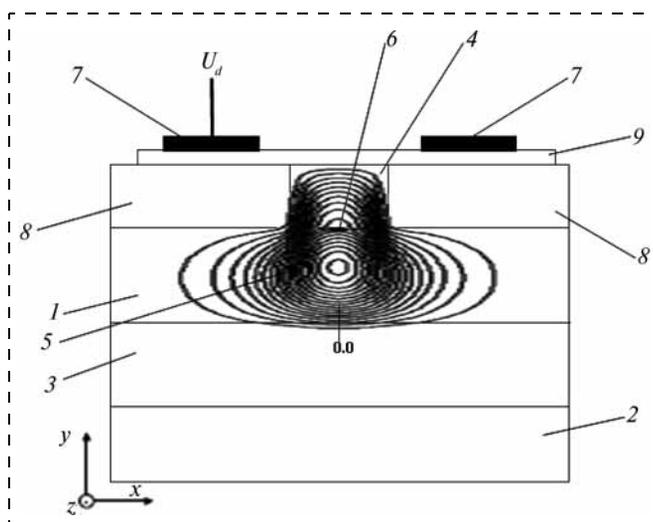


Рис. 1. Структурная схема фазового КНИ-модулятора

Таблица 1

Параметр	Значение
Длина волны света в вакууме, нм	1550
Температура, К	298
Показатель преломления кремния	3,47
Показатель преломления поликремния	3,45
Показатель преломления оксида кремния	1,43
Базовый уровень легирования кремния, см <sup>-3</sup>	1 × 10 <sup>15</sup>
Подвижность электронов, см <sup>2</sup> · (В · с) <sup>-1</sup>	700
Подвижность дырок, см <sup>2</sup> · (В · с) <sup>-1</sup>	300
Коэффициент абсорбции электронов, дБ/см	7,4
Коэффициент абсорбции дырок, дБ/см	2,6
Напряжение плоских зон, В	1,25

ограничение обеспечивается погруженным оксидом 3 и покрытием 9.

Для моделирования характеристик фотонного фазовращателя необходимо совместное решение, с одной стороны, связанных уравнения Пуассона и уравнения непрерывности для электронов и дырок, которые управляют транспортом заряда в полупроводниковой части устройства, а с другой стороны, уравнения Максвелла для гребенчатого волновода, которое описывает распространение оптического пучка через него. Для моделирования электрических характеристик использовали пакет моделирования Silvaco [6], оптические характеристики вычисляли методом распространяющихся пучков (beam propagation method, BPM), реализованным в коммерческой программе VeamPROP [7].

В табл. 1 приведены основные электрические и оптические параметры для моделирования характеристик модулятора.

Численные эксперименты проводили для различных значений продольной длины  $L$  (в  $z$ -направле-

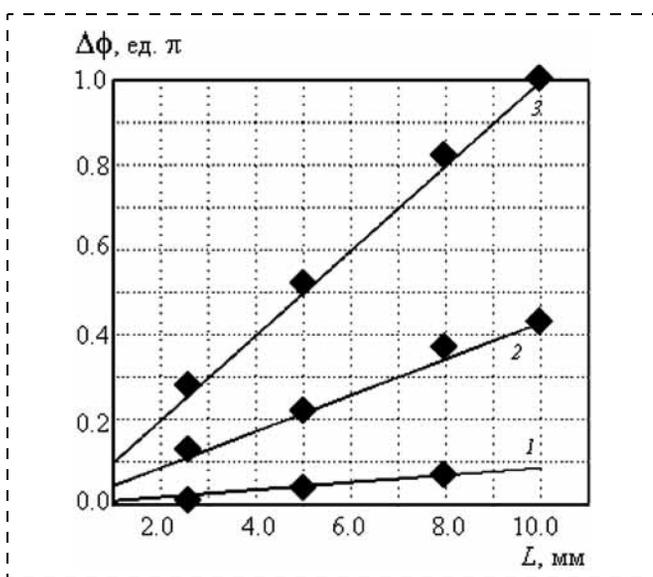


Рис. 2. Зависимость фазового сдвига  $\Delta\phi$  от длины  $L$  при управляющем напряжении  $U_d$ :

1 —  $U_d = 2$  В; 2 —  $U_d = 5$  В; 3 —  $U_d = 10$  В (ромбиками отмечены экспериментальные данные)

нии) фазового модулятора со следующей топологией волноводной структуры:  $W = H = 2,5$  мкм,  $h = 1$  мкм,  $t_{ox} = 15$  нм и толщиной погруженного оксида 0,4 мкм. Анализируемые устройства отвечают требованиям и ограничениям стандартного КНИ-техпроцесса с топологическими нормами 0,5 мкм [1–3].

Как следует из результатов моделирования, все волноводные структуры являются одномодовыми, поддерживающими только моду ТЕ-поляризации, что подтверждается экспериментальными исследованиями [1, 3].

На рис. 2 приведены результаты моделирования фазового сдвига  $\Delta\phi$  как функции продольной длины  $L$  при различных значениях управляющего напряжения  $U_d$ . Как видно из полученных результатов, с ростом параметра  $U_d$  существенно повышается эффективность фазовой модуляции. При этом для случая  $L = 10$  мм и  $U_d = 10$  В достигается максимальное значение  $\Delta\phi = \pi$ . Однако при напряжениях  $U_d$ , близких напряжению плоских зон, практически невозможно реализовать фазовую модуляцию. Это согласуется со следующим условием. Так, изменение плотности заряда  $\Delta Q_e$  (для электронов) и  $\Delta Q_h$  (для дырок), определяемое уровнем смещения  $U_d$ , можно оценить следующим соотношением [1]:

$$\Delta Q_{(e, h)} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{ox}}{q t_{ox} t} (U_d - U_{FB}), \quad (1)$$

где  $\epsilon_0$  и  $\epsilon_{ox}$  — вакуумная диэлектрическая проницаемость и низкочастотная диэлектрическая проницаемость оксида кремния;  $q$  — электронный заряд;  $t$  — эффективная толщина зарядового слоя (сравнимая с  $t_{ox}$ );  $U_{FB}$  — напряжение плоских зон КНИ-структуры. Из этого соотношения видно, что при небольших управляющих напряжениях плотность свободных зарядов стремится к нулю, т. е. не происходит значимого изменения показателя преломления волновода.

На этом же рисунке также приведены экспериментально измеренные значения фазового сдвига [1, 3], которые находятся в хорошем согласовании с результатами моделирования.

В рассматриваемой конструкции фазовый сдвиг  $\Delta\phi$ , возникающий в результате изменения управляющего напряжения, аппроксимируется эмпирическим выражением ( $\Delta\phi$  в единицах  $\pi$ ):

$$\Delta\phi = k(U_d - U_{FB})L, \quad (2)$$

где  $k$  — коэффициент топологии волноводной структуры.

Для рассматриваемой структуры числовое значение коэффициента составляет 0,01141. Масштабирование технологических параметров приведет к изменению его значения. Однако в любом случае уменьшение латерального размера модулятора влечет

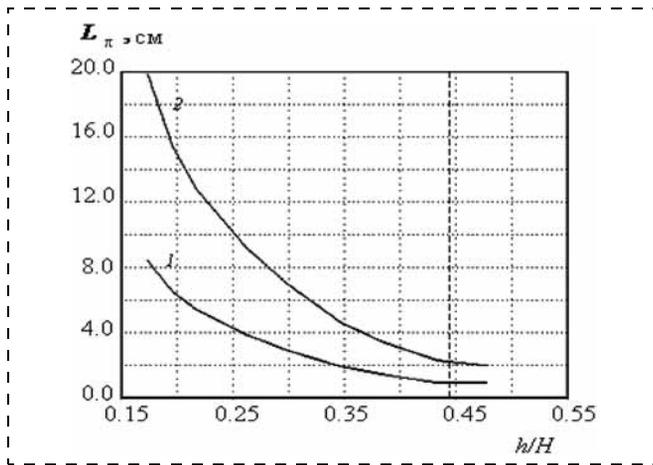


Рис. 3. Зависимость  $L_{\pi}$  от отношения  $h/H$  при разных управляющих напряжениях  $U_d$ :

1 —  $U_d = 10$  В, 2 —  $U_d = 5$  В. Штриховая линия — граница модового режима

пропорциональное увеличение напряжения питания для сохранения эквивалентного сдвига фазы.

Исследуя параметр  $L_{\pi}$  ( $L_{\pi}$  — продольный размер фазовращателя, при котором реализуется случай  $\Delta\phi = \pi$ ), проанализируем эффективность фазовой модуляции от глубины затвора  $h$ . Представляя результаты расчетов в координатах  $h/H$ , получим характерные зависимости для значений управляющего напряжения 5 и 10 В, которые приведены на рис. 3. Из полученных результатов следует, что эффективность фазовой модуляции существенно зависит от глубины затвора. При этом параметр  $L_{\pi}$  уменьшается с увеличением глубины затвора, а когда затвор располагается близко к центру волновода вдоль направления  $y$ , достигается минимальное значение  $L_{\pi}$ , что соответствует максимальной фазовой эффективности. Следует отметить, что когда относительная глубина  $h/H$  больше 0,44, волновод может поддерживать несколько мод, что является недопустимым для большинства приложений [3, 4].

Для исследования зависимости эффективности фазовой модуляции от толщины затвора  $t_{ox}$  необходимо сделать следующее замечание. Из соотношения (1) следует, что с уменьшением  $t_{ox}$  напряжение питания нужно снижать пропорционально, чтобы получить то же самое изменение плотности заряда. Сокращение  $U_d$  не только упрощает схему модулятора, но также и уменьшает полное рассеяние мощности. Чтобы оценить влияние толщины оксида затвора на фазовую эффективность, необходимо фиксировать изменение плотности индуцированного заряда.

На рис. 4 приведены результаты моделирования фазового сдвига как функции толщины затвора для базового образца. Мы выбрали значения  $t_{ox} = 15$  нм и  $U_d = 10$  В как отправную точку. А, например, для  $t_{ox} = 10$  нм управляющее напряжение  $U_d$  составляет 7,2 В и для  $t_{ox} = 5$  нм  $U_d = 3,7$  В. Тогда в случае

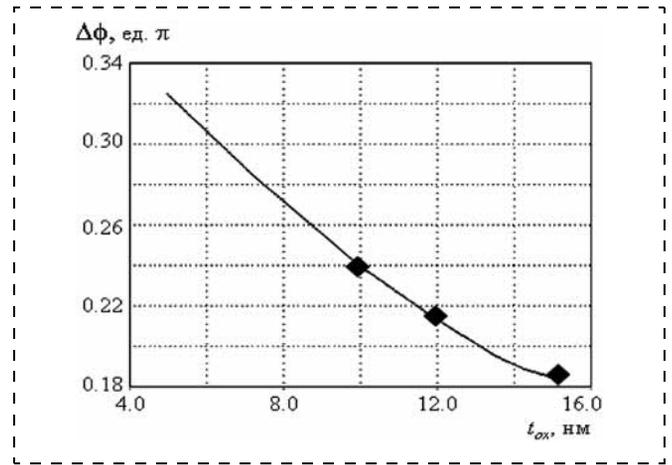


Рис. 4. Зависимость фазового сдвига от толщины затвора  $t_{ox}$  (ромбиком отмечены экспериментальные данные)

фиксированной плотности носителей фазовая эффективность монотонно увеличивается с уменьшением толщины затвора. При этом зависимость  $\Delta\phi(t_{ox})$  сохраняет нелинейный характер во всем исследуемом диапазоне. Однако можно выделить участок, где фазовый сдвиг практически линейно зависит от толщины затвора.

Вместе с тем, напряжение пробоя затвора снижается с уменьшением толщины оксида. Следовательно, напряжение питания не может превысить напряжение пробоя. Из экспериментальных данных следует, что при напряженности поля 1 В/нм фазовращатель функционирует в обычном режиме [1].

Полученные выше результаты определяют основные ограничения при масштабировании геометрии фазовращателя.

### Масштабирование характеристик модулятора

Один из главных параметров рассматриваемых фотонных структур — полоса модуляции фазовращателя, которая напрямую связана с его емкостью [1, 3]. Для расчета полосы пропускания моделируется переходной процесс в фазовращателе, где вычисляется временная зависимость плотности индуцированного заряда на границе раздела оксид/кремний. Уменьшение емкостей служит основой для повышения скоростных возможностей приборов, выполненных по КНИ-технологии. Поскольку в процессе переключения происходит изменение зарядов, а процесс перезарядки требует затрат времени, то если удастся снизить емкость и сохранить переключающие свойства элемента, в результате уменьшаются времена переключения. В результате можно достичь одновременно уменьшения напряжения питания и повышения быстродействия.

Уменьшение геометрических размеров волноводной структуры является эффективным методом

Таблица 2

Параметры	Модификация		
	I	II	III
$L$ , мм	2,5	1,5	1,0
$W$ , мкм	1,0	0,85	0,85
$H$ , мкм	1,0	0,85	0,85
$h$ , мкм	0,44	0,37	0,37
$t_{\text{окс}}$ нм	12	8	6

снижения емкости фазовращателя. С этой точки зрения технология КНИ — привлекательная платформа, так как она позволяет масштабировать площадь поперечного сечения волновода до размеров, меньших 1 мкм, из-за высокого контраста показателя преломления между кремнием и его оксидом ( $\Delta n \sim 2$ ), что положительным образом скажется на существенном уменьшении емкости модулятора.

Численно анализировались три модификации фазового модулятора (параметры которых приведены в табл. 2) с той же толщиной погруженного оксида.

Как и в предыдущем случае, анализируемые устройства, во-первых, отвечают требованиям и ограничениям стандартного КНИ-техпроцесса с топологическими нормами 0,5 мкм и, во-вторых, как следует из результатов моделирования, все волноводы поддерживают только моду ТЕ-поляризации.

Результаты моделирования эффективности фазовой модуляции в зависимости от геометрии волновода приведены на рис. 5. Как видно из полученных результатов, уменьшение длины модулятора приводит к существенному снижению эффективности фазовой модуляции, которое частично можно компенсировать масштабированием поперечного сечения волновода и повышением уровня управляющего напряжения  $U_d$ .

Следует отметить, что для двухтактной работы интерферометра Маха—Цендера фазовращатель

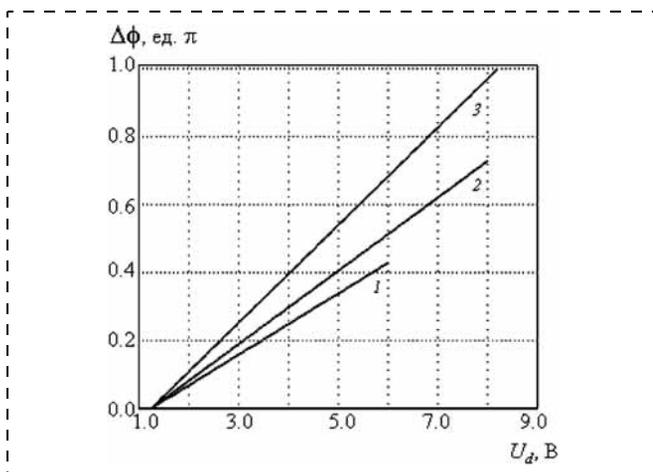


Рис. 5. Зависимость фазового сдвига от управляющего напряжения  $U_d$ :

1 — образец III; 2 — образец II; 3 — образец I

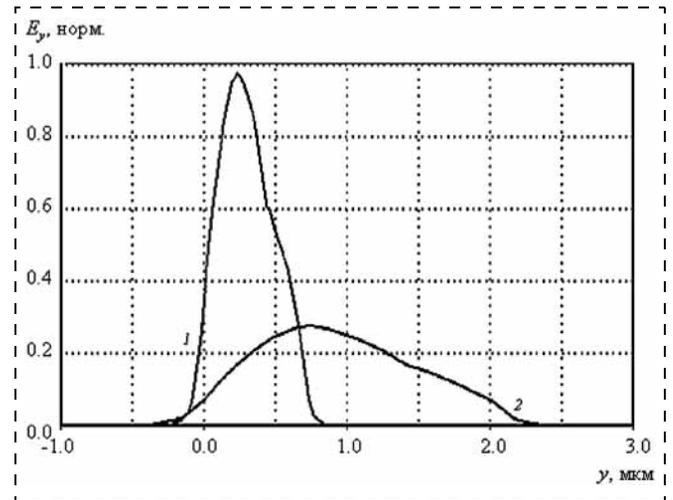


Рис. 6. Нормированное распределение оптического поля вдоль оси  $y$  при  $x=0$ :

1 — модификация II; 2 — базовая модификация

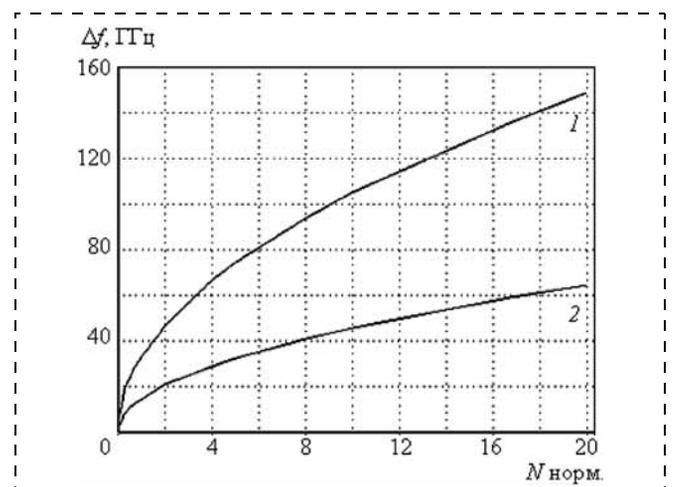


Рис. 7. Зависимость полосы модуляции от нормированной концентрации ( $N = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ):

1 — модификация II; 2 — модификация I

должен обеспечивать значение фазового сдвига не менее  $\pi/2$  [1, 3], данному критерию соответствуют модификации I и II.

На рис. 6 приведено нормированное распределение оптического поля вдоль оси  $y$ , соответствующее вертикальной оси симметрии устройства. Полученные результаты иллюстрируют причину увеличения эффективности фазовой модуляции при масштабировании поперечного сечения волновода, которая проистекает из-за существенного роста уровня оптического сигнала.

Для модификаций I и II рассчитана полоса модуляции по уровню 3 дБ. Результаты моделирования приведены на рис. 7. При моделировании переходного процесса важно учитывать статистику носителей, зависимость подвижности носителей от уровня легирования и напряженности электрического по-

ля, а также зависимость времен жизни перекомбинации носителей от уровня легирования.

Следует отметить, что образец I, обладая более хорошими модуляционными характеристиками, существенно проигрывает в полосе модуляции. Например, для модификации II при уровне легирования  $2,7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  расчетная полоса пропускания будет составлять 100 ГГц, а для образца I полоса будет составлять только 42 ГГц. Полоса модуляции может масштабироваться к еще более высоким значениям с более высокими концентрациями легирования.

## Заключение

Проанализированы фазовые характеристики кремниевых фотонных фазовых модуляторов, выполненных на базе стандартного КНИ-техпроцесса с топологическими нормами 0,5 мкм. Для моделирования характеристик использовалось совместное решение, с одной стороны, связанных уравнения Пуассона и уравнения непрерывности для электронов и дырок, которые управляют транспортом носителей заряда в полупроводниковой части модулятора, а с другой стороны, уравнения Максвелла для гребенчатого волновода, которое описывает распространение оптического пучка через него. Определены пути оптимизации параметров субмикронных фотонных устройств для реализации широкополосной модуляции с высокой эффективностью.

Результаты моделирования, проведенного с учетом технологических ограничений, хорошо согласуются с экспериментальными данными.

В перспективе свойства исследуемых субмикронных фотонных устройств предоставляют возможность интегрировать их как в оптические, так и электронные интегральные схемы, предназначенные для реализации высокопроизводительных систем обработки информации, поскольку есть широкий диапазон варьирования параметров приборов для их совместимости с выбранным приложением.

## Список литературы

1. Salib M., Liao L., Jones R., Morse M., Liu A., Samara-Rubio D., Alduino D., Paniccia M. Silicon Photonics // Intel Technology Journal. 2004. Vol. 8. P. 143–160.
2. Bogaerts W., Baets R., Dumon P., Wiaux V., Beckx S., Taillaert D., Luysaert B., Campenhout J., Bienstman P., Thourhout D. Nanophotonic waveguides in silicon-on-insulator fabricated with CMOS technology // IEEE J. of Lightwave Technology. 2005. Vol. 23. P. 401–412.
3. Soref R. The past, present, and future of silicon photonics // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2006. Vol. 12. P. 1678–1687.
4. Масальский Н. В. Волноводный оптический интерферометр Маха—Цендера на структуре кремний на изоляторе // Датчики и системы. 2012. № 7. С. 56–58.
5. Soref R., Bennett B. Electro optical effects in silicon // IEEE J. Quantum Electron. 1987. Vol. QE-23. P. 123–129.
6. Silvaco International, 4701 Patrick Henry drive, Bldg 1, Santa Clara, CA 94054 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.silvaco.com>.
7. Rsoft Photonic CAD Suite by RSoft Design Group, Inc. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rsoftdesign.com>

УДК 621.382.049.77 + 531:546.621-31

**Н. И. Мухуров**, д-р техн. наук, зав. лаб.,  
e-mail: n.mukhurov@gradon.bas-net.by,  
**Г. И. Ефремов**, канд. техн. наук, вед. науч. сотр.,  
**С. П. Жвавий**, д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотр.,  
Государственное научное учреждение "Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси", г. Минск

## ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ МИКРОКОММУТАТОРЫ. ЧАСТЬ 1. ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВКЛЮЧАЮЩИЕ МИКРОКОММУТАТОРЫ

*Поступила в редакцию 29.04.2013*

*Рассмотрены теоретические основы и проведены расчеты параметров электростатических включающих микрокоммутаторов плоскопараллельной конструкции. Применена методика расчета с учетом равенства активных электростатических и реактивных механических сил с разделением в рабочем цикле параметров на постоянные (конструктивная константа) и переменные (базовая функция) составляющие. Получены формулы эффективного вычисления основных параметров.*

**Ключевые слова:** электростатические включающие микрокоммутаторы, плоскопараллельная конструкция, формулы расчета основных параметров

## Введение

В микроэлектротехнике широко используются устройства с электростатическими актюаторами. Их преимущества состоят в мизерном потреблении электроэнергии, малых массогабаритных показателях, в применении технологии полупроводникового интегрального производства, высоких характеристиках точности, надежности, долговечности, в использовании при функционировании низких значений токов и напряжений. Естественно, что электростатические устройства нашли широкое использование в самых различных областях науки и техники [1]. Диапазон применения обуславливает, с одной стороны, создание специальных вариантов конструкций, с другой — стремительное увеличение выпускаемой продукции. В связи с этим актуальной задачей является математическое обоснование варианта, обеспечивающего реализацию требуемых выходных параметров. В спектре реализуемых

электростатических устройств значительное место занимают электростатические микрореле, которые осуществляют замыкание (прямой ход) или размыкание (обратный ход) управляемых цепей — рабочий цикл. Математический расчет рабочего цикла ограничен определением координат экстремальных значений функций электрического напряжения и смещения якоря в любой точке прямого хода [2—5].

В настоящей работе по результатам анализа прямого хода рабочего цикла выполнены математический расчет и разработка конструкций электростатических микрокоммутаторов (ЭМК) с учетом последовательно срабатывающих нормально замкнутых (НЗ) и нормально разомкнутых (НР) контактов.

Перспективным конструктивным материалом для микрореле является анодный оксид алюминия (АОА), обладающий высокими электромеханическими характеристиками и технологическими возможностями формирования объемных многоуровневых структур [6, 7].

### Методика расчета параметров

ЭМК возможны в двух конструктивных вариантах: плоскопараллельном (ПВК) (рис. 1) и торсионном (ТВК), в которые входят включающие микрокоммутаторы (ВМК) [2, 8] и переключающие микрокоммутаторы (ПКМ), создаваемые на основе включающих.

Схема ПВК содержит (рис. 1) основание 1, над которым расположен якорь 2, упругими элементами 3 опирающийся на основание. На последнем размещены неподвижные тянущий (НТЭ) 4 и отталкивающий (НОЭ) 5 электроды, а также неподвижные контакты (НК) 6. На якоре сформированы подвижные электрод (ПЭ) 7 и контакты (ПК) 8.

В исходном состоянии электроды параллельны, межэлектродное расстояние равно  $t$ . Контакты 7 и 8 нормально разомкнуты (НРК). При подаче электрического напряжения  $U$  на электроды и увеличении его значения якорь под действием активной электростатической силы  $F$  смещается на  $y$ , сближая и замыкая НРК, и деформирует упругие элементы, создавая в них реактивную механическую силу  $P$ .

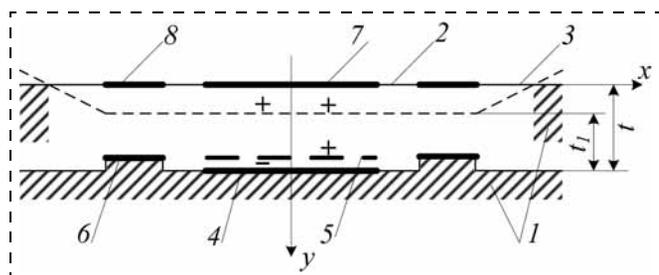


Рис. 1. Схемы плоскопараллельного варианта конструкции включающих микрокоммутаторов

Методика расчетов состоит в следующем:

- приравнивание  $F$  к  $P$  при повышении  $U$ ;
- разделение в формулах постоянных (конструктивная константа) и переменных (базовая функция) в цикле параметров на два множителя;
- выражение переменной части в нормированном виде;
- дифференцирование переменной части;
- проверка условия  $Q > 0$ , где  $Q$  — контактное усилие.

*Базовая функция* определяет характер относительного изменения параметра в рабочем цикле, его экстремальные точки и обозначается символом этого параметра со "звездочкой". Она является единой для всех вариантов данной конструктивной схемы.

*Конструктивная константа* содержит конкретные значения компонентов и определяет фактическое значение параметра. Обозначается символом  $C$  с соответствующим параметру индексом [8, 9].

Во включающих микрокоммутаторах (ВМК) используется электромеханический актюатор, в котором во всем рабочем цикле осуществляется взаимодействие активных электростатических и реактивных механических сил.

В плоскопараллельном варианте конструкции (ПВК) якорь остается параллельным основанию в течение всего цикла, а  $F$  равномерно распределена по всей длине электродов. Упругие элементы выполнены в виде консолей прямоугольного сечения, закрепленных в якоре и опирающихся свободным концом на выступы основания.

Межэлектродное расстояние исходной величины  $t$  при подаче на электроды разноименного потенциала в результате взаимодействия активных электростатических сил  $F$  и реактивных механических сил  $P$  уменьшается на соответствующую значению поданного электрического напряжения величину  $y$  (рис. 1). Смещение якоря завершается замыканием НРК.

### Расчет плоскопараллельного варианта торсионной конструкции

Исходное условие во всем цикле  $F_T = P_T$ , значит  $Q = 0$ .

Активная электростатическая сила [10]

$$F_T = \frac{\varepsilon_0 S U^2}{2(t-y)^2} = \frac{\varepsilon_0 S}{2t^2} \frac{U^2}{(1-m)^2} = C_F F^*, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м — электрическая постоянная;  $S$  — площадь электрода;  $y$  — смещение якоря;  $C_F$  — конструктивная константа для выражения электростатической силы;  $F^*$  — базовая функция

активной силы;  $m$  — нормированная величина смещения, равная

$$m = \frac{y}{l}. \quad (2)$$

Реактивная сила держателей

$$P_T = Ky, \quad (3)$$

где  $K$  — жесткость держателей [11];

$$K = k \frac{EJ}{l^3} q = k \frac{Eab^3}{12l^3} q; \quad (4)$$

$E$  — модуль упругости;  $J$  — момент инерции сечения держателей;  $k$  — число держателей;  $q$  — коэффициент заделки держателя;  $a, b, l$  — ширина, толщина, длина держателя.

Тогда

$$K = (Kt)m = C_P P^*, \quad (5)$$

где  $C_P$  — конструктивная константа для выражения механической силы.

Электрическое напряжение  $U_T$  определяется из формул (1), (5):

$$U_T = \left( \sqrt{\frac{2Kt^3}{\varepsilon_0 S}} \right) \sqrt{m(1-m)^2} = C_U U^*, \quad (6)$$

где  $C_U$  — конструктивная константа для выражения электрического напряжения.

Активная электростатическая сила  $F_T$  согласно тем же формулам равна

$$F_T = C_F F^* = Ktm = C_P P^* = P_T. \quad (7)$$

Контактное усилие

$$Q_T = F_T - P_T = 0. \quad (8)$$

Результаты расчетов базовых функций приведены в табл. 1 и на рис. 2.

Графически  $U_T^*$  при  $P_T^* = F_T^*$  выражается кривой типа полукубической несимметричной параболы с экстремальными значениями  $U_0^* = 0,385$  при  $m_0 = 0,33$  [3, 8], полученными дифференцированием функции. Снижение значения электрического напряжения после  $m_0$  является результатом интенсивного уменьшения  $t_1$  (см. рис. 1). Нулевая величина  $Q$  является результатом равновесия сил

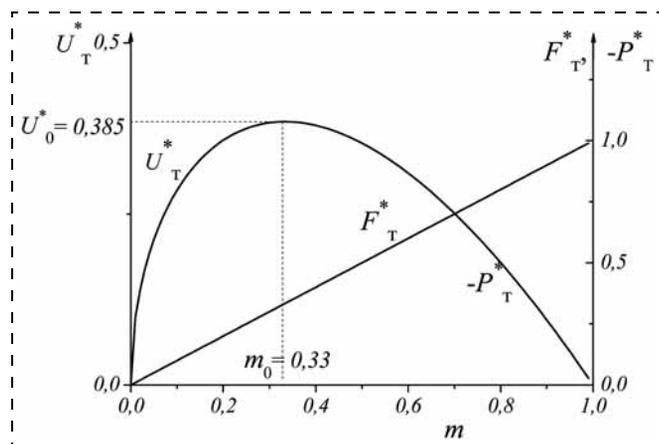


Рис. 2. Теоретические базовые функции параметров в плоскопараллельном включающем микрокоммутаторе

во всем цикле. Эти характеристики остаются неизменными для всех размеров рассматриваемой конструктивной схемы, что обосновывает наименование нормированных переменных параметров термином "базовые функции".

Функции  $P_T^*$  и  $F_T^*$  относительно  $m$  линейны.

### Практическая реализация плоскопараллельного включающего микрокоммутатора

Практически после  $m_0 = 0,33$  управляемое перемещение якоря прекращается, так как при минимальном превышении  $U_0^* > 0,385$  активные силы  $F$  в связи с резким уменьшением величины  $t$  —  $y$  превысят реактивные, равновесие будет нарушено и якорь мгновенно коллапсирует до упора в неподвижные контакты [12, 13], создавая контактное усилие и замыкая управляемую цепь. Снижение значения электрического напряжения  $U$  обусловит уменьшение сил  $F$ , а затем и  $P$ , что возвратит якорь в исходное положение. Таким образом, включение цикла состоит из "подготовительного" и "исполнительного" участков. Силы  $P$  остаются равными и линейными во всем диапазоне  $m$ , так как они пропорциональны смещению якоря независимо от природы и последовательности действия активных сил. Практические базовые функции на "подготовительном" участке при  $m = 0..0,33$  остаются прежними:

- электрическое напряжение  $U_{II} = U_T, U_{II}^* = U_T^* = \sqrt{m(1-m)^2}$ . Активная электростатическая сила  $F_{II} = F_T, F_{II}^* = F_T^* = m$ ;
- суммарное контактное усилие  $Q_{II} = Q_T = 0$ .

Таблица 1

Расчетные теоретические величины базовых функций

$m$	0	0,1	0,2	0,3	0,33	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$P_T^* \cdot 10^6, \text{ Н}$	0	0,1	0,2	0,3	0,33	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$U_T^*, \text{ В}$	0	0,28	0,36	0,38	0,38	0,38	0,35	0,31	0,25	0,18	0,10
$F_T^* \cdot 10^6, \text{ Н}$	0	0,1	0,2	0,3	0,33	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$Q_T^* \cdot 10^6, \text{ Н}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

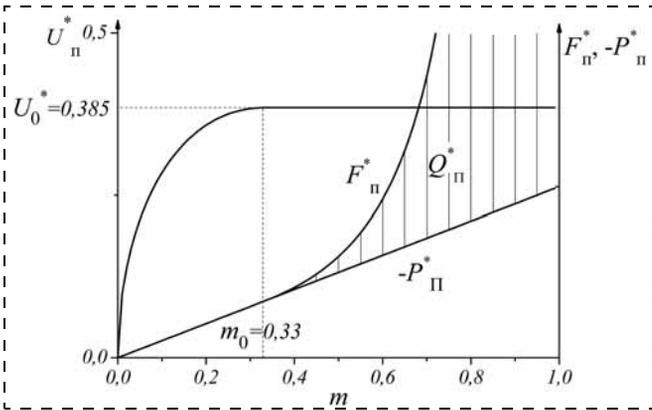


Рис. 3. Практические базовые функции параметров в плоскопараллельном включающем микрокоммутаторе

На исполнительном участке при  $m = 0,33...1,0$  практические базовые функции выражаются новыми соотношениями:

$$U_{\Pi} = 0,385 C_U; \quad (9)$$

$$F_{\Pi} = C_F \frac{U_{\Pi}^2}{(1-m)^2} = C_P \frac{0,385^2}{(1-m)^2}; \quad (10)$$

$$Q_{\Pi} = C_P \left( \frac{0,385^2}{(1-m)^2} - m \right). \quad (11)$$

Результаты расчетов представлены на рис. 3 и в табл. 2, которые отражают реальную схему срабатывания электростатических реле и возникновения контактного усилия. Отметим, что  $Q$  может быть увеличено за счет повышения  $U$ . Вместе с тем, его максимальное значение может регулироваться высотой контактных выступов. Реально для повышения надежности напряжение подается больше  $U_{\Pi}$ , можно предположить, раза в полтора. Это практически не изменит работу коммутатора, но повысит  $Q$ . Большее значение электрического напряжения снизит экономические показатели, это замечание относится ко всем последующим в статье расчетам.

Функционирование ЭМК неизбежно связано с деформированием подвижных элементов и воз-

никновением в них механических напряжений (МН)  $\sigma$ . Наиболее критичными в этом отношении являются консольные держатели, в которых величина  $\sigma$  в месте жесткого закрепления конца определяется формулой [11, 14]

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{6Pl}{ab^2}, \quad (12)$$

где  $M$  — момент силы, Н·м;  $W$  — момент сопротивления, м<sup>3</sup>.

Из формулы следует, что  $\sigma$  прямо пропорционально  $l$ . Однако, учитывая специфику динамики электростатических устройств (5) и (10) находим, что в ПВК при исходных данных (см. следующий раздел)

$$\sigma = k \frac{Eq}{2} \frac{by}{l^2} = C_{\sigma} \frac{by}{l^2} = 8,4 \cdot 10^{11} \frac{by}{l^2}, \quad (13)$$

т. е. связь  $\sigma$  и  $l$  изменяется, а именно: увеличение  $l$  уменьшает  $\sigma$ . В итоге  $\sigma$  уменьшается обратно пропорционально квадрату  $l$ , но возрастает при увеличении прогиба  $y$ . Значит, максимальный момент силы  $M$  возникает при  $y = t$ , а снижение  $\sigma$  можно достичь увеличением длины держателей. Варьирование этих размеров (рис. 4) дает широкие возможности для выполнения условия прочности

$$\sigma_{\max} = C_{\sigma} \frac{bt}{l^2} \leq \frac{\sigma_b}{n}, \quad (14)$$

где  $\sigma_b = 40 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup> [6] — предел прочности оксида алюминия;  $n$  — коэффициент запаса, применяемый для упругих, но хрупких материалов в высокочастотных многократных циклах (не менее двух).

Результаты расчетов  $\sigma$  при практически используемых конструктивных значениях  $b$ ,  $t$ , и  $l$  по (3), приведенные на рис. 4, определяют диапазон сочетаний размеров элементов от  $l = 3 \cdot 10^{-4}$  м,  $t = 5 \cdot 10^{-6}$  м,  $b = 3 \cdot 10^{-6}$  м до  $l = 9 \cdot 10^{-4}$  м,  $t = 15 \cdot 10^{-6}$  м,  $b = 10 \cdot 10^{-6}$  м, обеспечивающих реализацию условия (14).

Приведем методику проверочного и проектного расчетов конкретных конструкций плоскопараллельных включающих микрокоммутаторов.

Таблица 2

Результаты расчета параметров реальной схемы срабатывания электростатических реле и возникновения контактного усилия в практической реализации

$m$	0	0,1	0,2	0,3	0,33	0,35	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$P_{\Pi}^* \cdot 10^6$ , Н	0	0,1	0,2	0,3	0,33	0,35	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$U_{\Pi}^*$ , В	0	0,28	0,39	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
$F_{\Pi}^* \cdot 10^6$ , Н	0	0,1	0,2	0,3	0,33	0,351	0,412	0,593	0,926	1,65	3,71	14,8
$Q_{\Pi}^* \cdot 10^6$ , Н	0	0	0	0	0	0,001	0,012	0,093	0,326	0,95	2,91	13,9

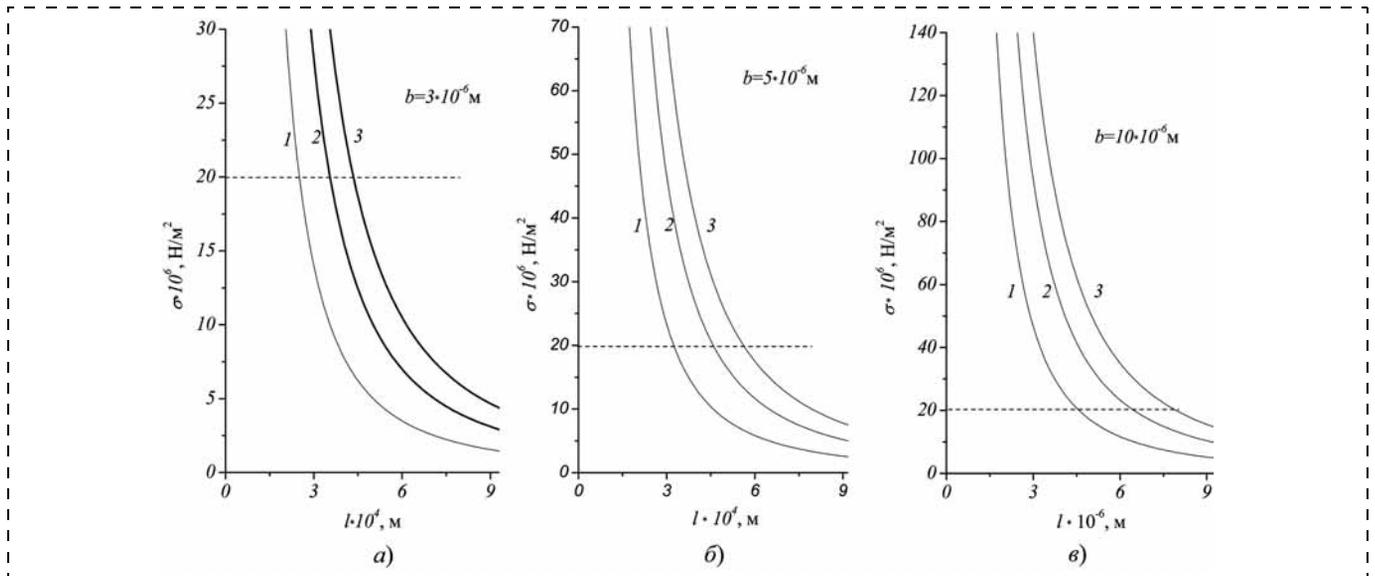


Рис. 4. Зависимость  $\sigma$  от деформации держателей при  $b = 3 \cdot 10^{-6}$  м (а),  $5 \cdot 10^{-6}$  м (б),  $10 \cdot 10^{-6}$  м (в) и  $t = 5 \cdot 10^{-6}$  м (1),  $10 \cdot 10^{-6}$  м (2),  $15 \cdot 10^{-6}$  м (3)

**Методика проверочного расчета выходных параметров разработанной конструкции**

Исходные данные:  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м,  $E = 1,4 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>,  $a = 60 \cdot 10^{-6}$  м,  $b = 5 \cdot 10^{-6}$  м,  $l = 600 \cdot 10^{-6}$  м,  $t = 10 \cdot 10^{-6}$  м,  $k = 4$ ,  $q = 3$ ,  $S = 3 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>,  $\sigma_b = 40 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>,  $J = \frac{ab^3}{12}$  м<sup>4</sup>.

- Определение жесткости  $K$  консольных держателей прямоугольного сечения

$$K = k \frac{Eab^3}{12l^3} q = 4,86 \text{ Н/м.}$$

- Расчет конструктивных констант

$$C_P = Kt = 48,6 \cdot 10^{-6} \text{ Н; } C_U = \sqrt{\frac{2Kt^3}{\epsilon_0 S}} = 19,1 \text{ В.}$$

- Расчет параметров в рабочем цикле:

— в диапазоне  $m = 0...0,9$

$$P = C_P m = 48,6 \cdot 10^{-6} m \text{ Н;}$$

— в диапазоне  $m = 0...0,33$

$$U = C_U \sqrt{m(1-m)^2} = 19,1 \sqrt{m(1-m)^2} \text{ В;}$$

$$F = C_P m = 48,6 \cdot 10^{-6} m \text{ Н;}$$

$$Q = F - P = 0;$$

— в диапазоне  $m = 0,33...0,9$

$$U = 0,385, C_U = 7,35 \text{ В;}$$

$$F = C_P \frac{0,385^2}{(1-m)^2} = 48,6 \cdot 10^{-6} \frac{0,385^2}{(1-m)^2} \text{ Н;}$$

$$Q = 48,6 \cdot 10^{-6} \left( \frac{0,385^2}{(1-m)^2} - m \right) \text{ Н.}$$

Данная конструкция обеспечивает срабатывание реле при значении электрического напряжения  $U = 7,35$  В, контактное усилие  $Q$  в диапазоне  $m = 0,7...0,9$  равно  $(46...676) \cdot 10^{-6}$  Н (табл. 3).

- Определение механических напряжений.

Согласно (13), (14) максимальное значение  $\sigma$  при  $y = t$  составляет  $\sigma = 1,17 \cdot 10^7 < 20 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>.

**Методика проектного расчета элементов разрабатываемой конструкции по заданным выходным параметрам**

В подавляющем большинстве ЭМК заданы электрическое напряжение  $U$  и принципиальная конструктивная схема, в данном случае ПВК. По информации из литературных источников максимальная величина  $U$  не превышает 50 В. ПВК характеризуется равенством  $U_T = U_{II} = U_0$  и срабатыванием при  $m = 0,33$ . Конструктивных параметров больше десяти, из которых только  $\epsilon_0$  и  $E$  имеют фиксированные значения, часть параметров определяет

Таблица 3

Расчетные параметры конкретной конструкции

$m$	0,1	0,2	0,3	0,33	0,35	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$P \cdot 10^6, \text{ Н}$	4,86	9,72	14,6	16,0	17,0	19,4	24,3	29,2	34,0	38,9	43,7
$U, \text{ В}$	5,44	6,84	7,32	7,35	7,35	7,35	7,35	7,35	7,35	7,35	7,35
$F \cdot 10^6, \text{ Н}$	4,86	9,72	14,5	16,0	17,1	20,0	28,7	44,9	79,8	180	719
$Q \cdot 10^6, \text{ Н}$	0	0	0	0	0,1	0,6	4,4	15,7	45,8	141	676

ся конструктивной схемой ( $k, q, m_0$ ), остальные требуется выбирать. Для определения их значений, естественно, можно использовать практические данные. Однако, учитывая взаимосвязь ряда элементов между собой, целесообразно использовать в методике расчета группировку элементов, которая в итоге должна дать результат, отвечающий сформулированным требованиям исходных параметров, после чего определить конкретные размеры этих элементов.

Рассмотрим варианты таких группировок. Используя формулы (1)–(3), (6) и учитывая, что  $k = 4$ ,  $q = 3$ ,  $m_0 = 0,33$ ,  $E = 1,4 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup> [11],  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м, запишем исходное соотношение в виде

$$U^2 = \frac{2Kt^3}{\varepsilon_0 S} m(1-m)^2 = \frac{kEab^3qt^3}{6l^3\varepsilon_0 S} m(1-m)^2 = 4,69 \cdot 10^{21} \frac{ab^3t^3}{l^3 S} \text{ В}^2. \quad (15)$$

Вариант "геометрического" расчета основан на объединении компонентов держателя, выраженных в долях  $n$  заданного максимального прогиба  $y_{\max} = t$ :

$$a = n_a t, \quad b = n_b t, \quad l = n_l t.$$

Коэффициенты  $n_a, n_b, n_l$  определяются из вариантов реальных конструкций. Комплекс этих размеров в значительной мере определяет реактивную силу  $P$ .

Вводим соотношения в (15) и находим последний параметр — площадь:

$$S = 4,69 \cdot 10^{21} \frac{n_a n_b^3 t^4}{n_l^3 U^2} \text{ м}^2. \quad (16)$$

При  $U = 20$  В,  $t = 10 \cdot 10^{-6}$  м,  $n_a = 6$ ,  $n_b = 0,5$ ,  $n_l = 50$  получаем

$$S = 0,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Как видно из формулы (16), корректировка  $S$  может достигаться изменением  $t$  (рис. 5) или коэффициентов нормирования  $n$ .

Вариант "силового" расчета учитывает напряженное механическое состояние деформированных держателей при  $y_{\max} = t$ .

Согласно формулам (13), (14)

$$\sigma = 8,4 \cdot 10^{11} \frac{bt}{l^2} \leq 20 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2.$$

Этому условию удовлетворяют многие сочетания (см. рис. 4). Выберем, например, такой вари-

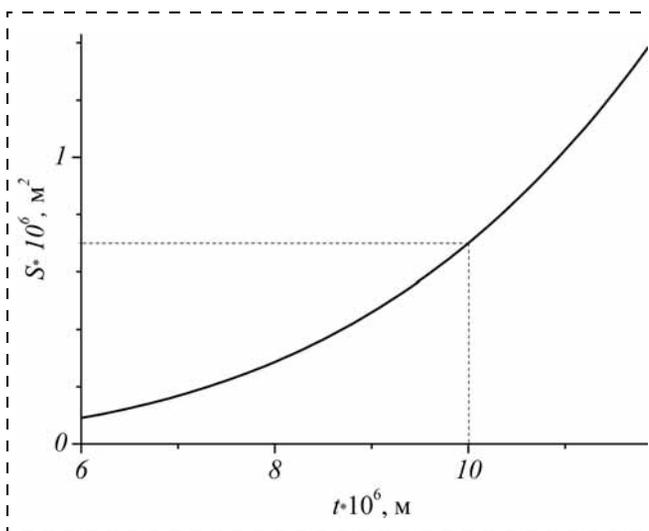


Рис. 5. Зависимость площади электрода  $S$  от межэлектродного расстояния  $t$

ант, в котором  $\sigma = 11,7$  Н/м<sup>2</sup> обеспечивается соответствующими размерами элементов:

$$b = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}, \quad t = 10 \cdot 10^{-6} \text{ м}, \quad l = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

В результате формула (15) примет вид

$$U^2 = 2,71 a/S,$$

откуда площадь

$$S = 2,71 a/U^2. \quad (17)$$

Приняв практически реальное значение  $a = 60 \cdot 10^{-6}$  м и учитывая заданное значение электрического напряжения, определяем, что  $S = 0,4 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>.

Данные рис. 4, 5 позволяют варьировать расчетными размерами в широких пределах, создавая оптимальные условия для технологических процессов.

## Заключение

Можно сделать следующие выводы:

- плоскопараллельный включающий микрокоммутатор содержит плоский якорь с электродом, расположенным параллельно электроду на основании. При включении  $U$  под действием электро-механических сил  $F$  якорь поступательно перемещается к основанию, деформируя держатели и создавая в них реактивную механическую силу  $P$ . В рабочем цикле силы  $F$  на якоре распределены равномерно по всей длине электродов;
- теоретически базовая функция  $U^*(m)$  представляет собой кривую в виде несимметричной полукубической параболы с экстремальными значениями  $U_0^* = 0,385$  при  $m_0 = 0,33$ . Базовые функции  $P^*$  и  $F^*$  зависят от  $m$  линейно и численно равны;

- практически после  $m_0 = 0,33$  значение электрического напряжения остается постоянным или продолжает возрастать до конца прямого хода, т. е.  $U_0^* \geq 0,385$ , что приводит к резкому уменьшению  $t_1$  и увеличению  $F^*(m)$ .  $P^*(m)$  остается линейной. Разность  $F^*(m) - P^*(m)$  создает контактное усилие  $Q^*(m)$  в НРК, которое в интервале  $m = 0,4...0,9$  возрастает с 0,012 до 13,9;
- участок рабочего цикла до  $m_0 < 0,33$  является "подготовительным", он не несет функциональных нагрузок. Участок  $m_0 \geq 0,33$  является "исполнительным", на котором реализуется назначение плоскопараллельного включающего микрокоммутатора — замыкание нормально разомкнутого контакта с усилием  $Q^*$  и включение внешней управляемой цепи.

#### Список литературы

1. **Нано- и микросистемная техника.** От исследований к разработкам // Сб. статей / Под ред. П. П. Мальцева. М.: Техносфера, 2005. 592 с.
2. **Chan E. K., Dutton R. W.** Electrostatic micromechanical actuator with extended range of travel // J. Microelectromechanical System. 2000. Vol. 8, N 3. P. 321—328.
3. **Алексеев А. Г., Болан Н. Н.** Анализ эффекта схлопывания электродов электростатических актюаторов в

MENS и HEMS-устройствах // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 7. С. 31—41.

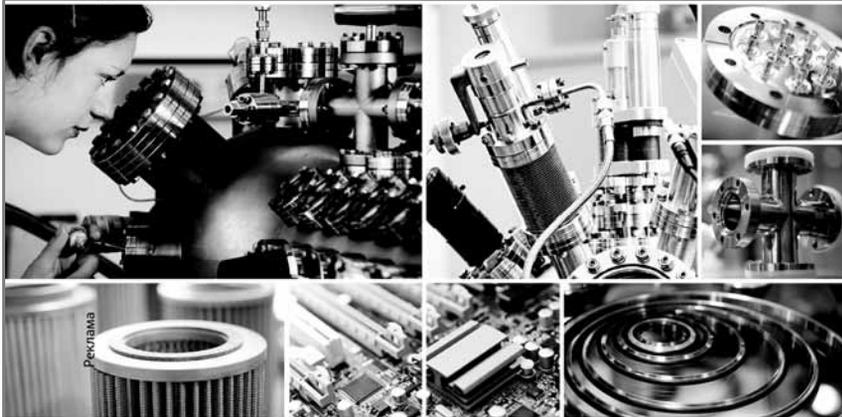
4. **Дятлов В. А., Коняшкин В. В., Потапов Б. Е., Фадеев С. И.** Пленочная электромеханика. Новосибирск: Наука, 1991. 248 с.
5. **Hah D., Yoon T., Hong S.** A low-voltage actuated micro-machined microwave switch using torsion springs and leverage // MTT. 2000. Vol. 48, N 12. P. 2540—2545.
6. **Мухуров Н. И.** Алюмооксидные микро-, наноструктуры для микроэлектромеханических систем. Минск: Беспринт, 2004. 166 с.
7. **Мухуров Н. И., Ефремов Г. И.** Электромеханические микроструктуры. Минск: Белорусская наука, 2012. 257 с.
8. **Ефремов Г. И., Мухуров Н. И.** Функциональные возможности электростатических микрореле по результатам моделирования // Тр. Научно-техн. конф. "Кибернетика и технологии XXI века". Воронеж, 2001. С. 499—508.
9. **Мухуров Н. И., Ефремов Г. И., Жвавый С. П.** Теоретическое моделирование плоскопараллельных двухэлектродных микроактюаторов // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 1. С. 15—23.
10. **Kuchling H.** Physik. Leipzig: VEB Fachbuchverlag, 1980. 332 p.
11. **Пономарев С. Д., Бидерман В. Л., Лихарев К. К.** и др. Расчеты на прочность в машиностроении. М.: Наука, 1956. 568 с.
12. **Efremov G. I., Mukhurov N. I.** Modeling of electrostatic microrelay duty cycle // Proc. of SPIE. 2001. Vol. 4407. P. 322—326.
13. **König E.-R., Wachutka G.** Analysis of unstable behavior occurring in electro-mechanical microdevices // Proc. MSM, Puerto Rico, 1999. P. 330—333.
14. **Мухуров Н. И., Ефремов Г. И., Жвавый С. П.** Упругие элементы в микроэлектромеханических системах // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 12. С. 12—22.

**9-я Международная выставка  
вакуумной техники, материалов и технологий**  
15–17 апреля 2014 года  
Москва, КВЦ «Сокольники»

**Вакуум  
ТехЭкспо**

единственная в России и СНГ

выставка вакуумной отрасли



- вакуумная техника и технологии
- сублимационное оборудование
- криогенное оборудование
- аналитическое оборудование, работающее в вакуумной среде
- оборудование и технологии для нанесения функциональных покрытий

забронируйте стенд на сайте

[www.vacuumtechexpo.com](http://www.vacuumtechexpo.com)

Организатор:

**MVK** Тел.: +7 (495) 935 81 00  
E-mail: [vacuumtechexpo@ite-expo.ru](mailto:vacuumtechexpo@ite-expo.ru)

При поддержке:

**ИИТ** НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ  
ИМ. С.А. ВЕКШИНСКОГО

Генеральный спонсор:

**INTECH**

УДК 51-74

**А. В. Вишнеков**, д-р техн. наук, проф.,  
e-mail: avishnekov@hse.ru,

**В. В. Ерохин**, канд. техн. наук, доц.,  
e-mail: vladimir.v.erokhin@gmail.com,  
Московский институт электроники и математики  
Национального исследовательского университета  
"Высшая школа экономики" (МИЭМ НИУ ВШЭ)

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ НА КРИСТАЛЛЕ: РИСКИ И РЕШЕНИЯ

*Поступила в редакцию 21.03.2013*

*Рассматривается методика автоматизированного выбора проектного решения системы на кристалле (СНК) в условиях многокритериальности, основанная на применении методов теории принятия решений. Особое внимание уделяется вопросам построения и анализа иерархии критериев оценки проектного решения СНК с учетом критериев электромагнитной совместимости. Приводится пример расчета ценности альтернативных проектных решений СНК на основе предложенной методики.*

**Ключевые слова:** проектное решение, лицо, принимающее решение, система на кристалле, критерии оценки качества проектного решения, СФ-блок, IP-блок

Систему на кристалле (СНК) можно определить как функционально законченное микроэлектронное изделие, содержащее все необходимые для работы компоненты (кроме, может быть, ЗУ) и работающее, как правило, под управлением операционной системы или сложной мониторной программы.

Современные СНК могут содержать на одном кристалле до нескольких десятков различных сложных устройств, таких как один или несколько процессоров, память, порты ввода-вывода, типовые интерфейсы (USB, Ethernet), блоки специальной обработки информации и другие сложные функциональные блоки (СФ-блоки, они же IP-блоки). Здесь надо отметить, что уже один процессор может быть весьма сложным устройством, например, 64-разрядный RISC-процессор с сопроцессором обработки чисел с плавающей точкой и другими сопроцессорами.

Новейшими тенденциями в развитии СНК является включение в их состав высокочастотных блоков приемопередатчиков, что требует тщательного учета ранее неактуального фактора электро-

магнитной совместимости в процессе проектирования СНК наряду с другими критериями.

Таким образом, СНК — система очень высокой степени сложности. По некоторым оценкам, разработка СНК с нуля может потребовать до нескольких сотен человеко-лет. В то же время ускорение научно-технического прогресса требует быстрого выхода на рынок, показатель time-to-market — один из важнейших для успешного выхода на рынок, позволяющий оправдать высокие затраты на разработку и производство СНК. Опоздавший же с выходом на рынок рискует потерять все свои вложения в разработку.

При разработке СНК, состоящих из законченных сложных функциональных блоков (СФ-блоков), возможны следующие подходы:

- покупка готового СФ-блока, как правило, проверенного в кремнии (silicon-proven), за качество которого отвечает производитель. В этом случае в зависимости от вида СФ-блока его качество может быть полностью гарантировано продавцом (покупка СФ-блока в виде топологической конструкции) или частично, когда продавец отвечает только за качество RTL (RTL-register transfer level) кода, в случае поставки СФ-блока в виде RTL-кода, когда топологию выполняет покупатель;
- использование СФ-блоков собственной разработки;
- использование СФ-блоков, полученных из открытых источников, как правило, не проверенные в кремнии. В этом случае не гарантируется ни качество кода, ни качество его тестирования и верификации.

На начальной стадии проектирования кристалла СНК, после того как закончены проектирование архитектуры и структуры СНК, необходимо решить, каким образом наиболее целесообразно приобрести тот или иной СФ-блок. Главный критерий здесь — скорость выпуска изделия, а ограничителем выступает стоимость проекта. Следует отметить, что качество проектирования, являющееся важнейшим фактором, существенно влияет на стоимость. Например, если образец СНК выпускается отлаженным в недостаточной степени, то велик риск повторного запуска производства кристалла, что сильно удорожает проект.

Оптимальным с точки зрения скорости разработки СНК является первый подход, однако он и самый затратный с финансовой точки зрения.

Крупные фирмы почти всегда в состоянии пойти по этому варианту. Для среднего бизнеса, который не обладает большими финансовыми ресурсами, он не всегда приемлем.

Второй подход в чистом виде используется достаточно редко из-за почти неизбежного увеличения сроков разработки СНК. Однако он необходим в случае, если блок является инновационным или требуется экономия финансовых ресурсов. Как правило, полностью избежать разработки собственных блоков не удается.

Третий подход возможен в случае наличия необходимого СФ-блока в открытом доступе. Однако здесь имеются следующие риски:

- блоки, как правило, не проверены в кремнии;
- блоки выставлены не в полнофункциональном варианте, который требуется дополнительно оплатить;
- блок может быть не отестирован адекватно;
- требуется доработка блока, например, изменение его внешнего интерфейса.

Таким образом, в этом случае в конечном итоге риски могут выливаться в дополнительные затраты.

Затраты на разработку СНК складываются из:

- покупки СФ-блоков;
- разработки СФ-блоков;
- стоимости разработки аппаратной части СНК (собственно разработка, тестирование, верификация проекта);
- разработки программной части;
- стоимости опытной партии (одной или нескольких в зависимости от результатов тестирования);
- стоимости промышленной партии.

На данной стадии рассмотрения проблемы целесообразно ограничить обсуждение оптимизацией затрат на разработку аппаратной части СНК. Здесь и далее будем считать, что трудоемкость проектирования СНК из уже готовых СФ-блоков не зависит от того, каким образом получены те или иные СФ-блоки: куплены ли они, разработаны самостоятельно или получены каким-то другим путем. В этом случае вопрос сводится к способу получения СФ-блоков, из которых состоит СНК.

Для решения данной задачи предлагается использовать методы теории принятия решений. Данные методы позволяют разложить сложную процедуру принятия решения в условиях многокритериальности в последовательность процедур, которые человек может проводить безошибочно по результатам психологических исследований.

Для автоматизации выбора правильной стратегии разработки СНК лицом, принимающим решение (ЛПР), необходимо учитывать целый ряд критериев, к которым, в частности, можно отнести:

- стоимость проектирования СФ-блока ( $Q_1$ );
- стоимость средств разработки, используемых при проектировании СФ-блока ( $Q_2$ );
- время разработки ( $Q_3$ );

- качество разработки ( $Q_4$ );
- электромагнитную совместимость с другими СФ-блоками ( $Q_5$ );
- качество сопровождения ( $Q_6$ );
- стоимость сопровождения ( $Q_7$ ).

С точки зрения электромагнитной совместимости наиболее чувствительными устройствами являются такие блоки, как аналого-цифровые, цифро-аналоговые преобразователи, умножители частоты (PLL) и некоторые другие.

Ранее основными критериями при разработке СНК были стоимость, площадь, производительность и надежность. Критерий электромагнитной совместимости либо отсутствовал, либо имел второстепенное значение, но сейчас он выходит на первый план. Теперь производители СНК вынуждены разрабатывать свою продукцию в соответствии с нормами электромагнитной совместимости. Критерий электромагнитной совместимости СНК необходимо разложить на следующие критерии: электромагнитного излучения и электромагнитной помехоустойчивости [5].

В настоящее время поставщики IP-блоков не указывают данные по этим двум критериям, поэтому разработчик вынужден проводить цикл измерений самостоятельно для принятия решений по критерию электромагнитной совместимости IP-блоков в СНК. Разработчик СНК должен расставить весовые коэффициенты результатам измерений, полученных на основе применения нижеуказанных методов.

Для оценки *электромагнитного излучения* IP-блоков в соответствии с современными стандартами (IEC 61967, IEC 62132) используют следующие методы измерений [6]:

- ✓ метод измерения электромагнитного излучения с помощью ТЕМ-камеры (критерий  $Q_5^{11}$ );
- ✓ метод поверхностного сканирования ( $Q_5^{12}$ );
- ✓ метод прямого соединения 1 Ом/150 Ом ( $Q_5^{13}$ );
- ✓ стендовый метод с применением клетки Фарадея ( $Q_5^{14}$ );
- ✓ метод магнитного зонда ( $Q_5^{15}$ ).

Для оценки *электромагнитной помехоустойчивости* используют следующие методы измерений [6]:

- ✓ метод измерения с помощью ТЕМ-камеры (критерий  $Q_5^{21}$ );
- ✓ метод инъекции объемного тока ( $Q_5^{22}$ );
- ✓ метод прямого введения мощности ( $Q_5^{23}$ );
- ✓ стендовый метод с применением клетки Фарадея ( $Q_5^{24}$ ).

Результаты измерений являются значениями соответствующих частных критериев оценки электромагнитной совместимости. Разработчик СНК на основе метода аналитических иерархий рассчитывает веса базовых и частных критериев оценки проектного решения.

Определим разновидности процедур, выполняемых ЛПР, по степени сложности [1, 2]:

- сложные процедуры (С) — при выполнении которых ЛПР допускает упрощение полученной информации, так как обобщенный анализ ее по результатам психологических исследований невозможен;
- допустимые процедуры (Д) — типичные для ЛПР процедуры, многократно совершаемые им на практике, либо процедуры, выполнение которых не требует упрощения исходной информации, хотя анализ ее достаточно сложен;
- неопределенные процедуры (Н, НС, НД) — процедуры, по которым отсутствуют результаты психологических исследований, но анализ уже известных факторов позволяет вынести предварительное решение о допустимости (НД) или сложности процедуры (НС).

Типовые процедуры, используемые ЛПР в методах поддержки принятия решений:

1. Процедуры с критериями:
  - 1) назначение весов критериев (С);
  - 2) ранжирование критериев по важности (С).
2. Процедуры с альтернативами:
  - 1) сравнение двух альтернатив и выделение лучшей из них (С);
  - 2) выбор лучшей альтернативы из группы (С);
  - 3) нахождение "идеальной альтернативы", близость к которой определяет качество текущего решения (С).
3. Процедуры с оценками:
  - 1) сравнение двух оценок по шкале одного критерия (Д);
  - 2) сравнение изменений оценок двух критериев (определение превосходства одного из них);
  - 3) определение количественного изменения оценки одного критерия, которое эквивалентно изменению оценки другого (критерии принимаются равноценными) (НС);
  - 4) определение удовлетворительного значения по каждому критерию (НД);
  - 5) выделение всех или части критериев, оценки по которым должны быть улучшены, могут быть ухудшены, либо остаться не хуже установленного удовлетворительного уровня (совокупность процедур 1 и 2) (Д);
  - 6) выделение оценок по критериям, неудовлетворительным (удовлетворительным) в какой-то степени (Д).

К основной особенности рассматриваемой задачи принятия решения относится наличие численных и лингвистических критериев.

Для решения поставленной задачи предлагается использовать метод аналитических иерархий, использующий допустимые процедуры [3].

Постановка задачи принятия решений может выглядеть следующим образом. Цель решения задачи — определить стратегию разработки СНК.

Критерии выбора рациональной стратегии приведены выше ( $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6, Q_7, Q_8$ ). Требуется выбрать наиболее рациональную стратегию разработки СНК.

Решение задачи состоит из совокупности этапов.

На первом этапе строится модель поставленной задачи принятия проектного решения в виде многоуровневой иерархии. Основными уровнями иерархии являются уровни цели, критериев и альтернатив. Однако число подуровней в уровне критериев может варьироваться в зависимости от сложности оценки альтернативных проектных решений по заданным базовым критериям. Базовые критерии могут описываться иногда с помощью достаточно сложной иерархии частных критериев.

На втором этапе проводится попарное сравнение критериев по степени важности в соответствии с принятой шкалой оценки степени предпочтительности [3]. Результаты заносятся в таблицу сравнительной важности критериев.

На третьем этапе по каждому из базовых или частных критериев проводится попарное сравнение альтернативных вариантов проектного решения СНК. Результаты также заносятся в таблицу сравнительной предпочтительности альтернатив.

На четвертом этапе рассчитываются веса критериев и ценность альтернативных проектных решений СНК по каждому критерию.

На пятом этапе вычисляется итоговое значение функции ценности каждой альтернативы с учетом всех критериев оценки проектных решений СНК.

На шестом этапе альтернативные проектные решения СНК ранжируются по степени предпочтительности для ЛПР на основе величины итоговой функции ценности. Чем больше значение функции ценности, тем данное проектное решение СНК более предпочтительно.

Для проверки мнений ЛПР на согласованность при заполнении таблиц попарных сравнений критериев и альтернатив необходимо рассчитывать индекс согласованности  $L$  [3]. Подсчитывается среднее значение индекса согласованности  $R$  для кососимметричных матриц, заполненных случайным образом. Для матрицы размера  $n = 7$  индекс  $R = 1,32$ . Вычисляется отношение согласованности  $T = L/R$ . Если значение  $T > 0,1$ , рекомендуется таблицу попарных сравнений заполнить заново.

*Достоинства метода аналитических иерархий для решения поставленной задачи:*

- возможность сравнения альтернативных проектных решений СНК с учетом численных и лингвистических критериев оценки качества проектного решения;
- метод применим, даже если значения оценок по критериям невозможно рассчитать, а можно лишь оценить степень предпочтительности одной альтернативы над другой по рассматриваемому критерию.

	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>6</sub>	Q <sub>7</sub>
Q <sub>1</sub>	1	3	1/3	1	5	5	5
Q <sub>2</sub>	1/3	1	1	1/3	5	5	5
Q <sub>3</sub>	3	1	1	3	5	7	5
Q <sub>4</sub>	1	3	1/3	1	9	5	5
Q <sub>5</sub>	1/5	1/5	1/5	1/9	1	3	1
Q <sub>6</sub>	1/5	1/5	1/7	1/5	1/3	1	1
Q <sub>7</sub>	1/5	1/5	1/5	1/5	1	1	1

### Недостатки метода:

- увеличение списка рассматриваемых не доминирующих альтернатив ведет к пересмотру степени предпочтительности между существующими парами альтернатив;
- шкала предпочтительности альтернатив четко не обоснована.

Рассмотрим пример выбора проектного решения блока СНК с использованием метода аналитических иерархий.

СНК должна содержать следующие СФ-блоки:

- ♦ Блок А может быть куплен у фирмы AF1 (альтернатива A1), он проверен в кремнии, стоит AS1, или у фирмы AF2 (альтернатива A2), он прототипирован в FPGA по цене AS2. Блок может быть разработан собственными силами (альтернатива A3). Стоимость разработки собственными силами, включая отладку и тестирование, составляет AS3.
- ♦ Блок В может быть куплен у фирмы BF1, он проверен в кремнии, стоит BS1, или взят в открытом доступе (BF2), в кремнии не проверен, интерфейс требует доработки, ориентировочная стоимость которой BS2. Стоимость разработки собственными силами, включая отладку и тестирование фирмы, составляет BS3. Стоимость средств САПР, используемых для разработки/доработки включена в указанные суммы.
- ♦ Блок С. Альтернатив нет, необходимо разрабатывать своими силами. Стоимость разработки собственными силами, включая отладку и тестирование фирмы, составляет CS3.

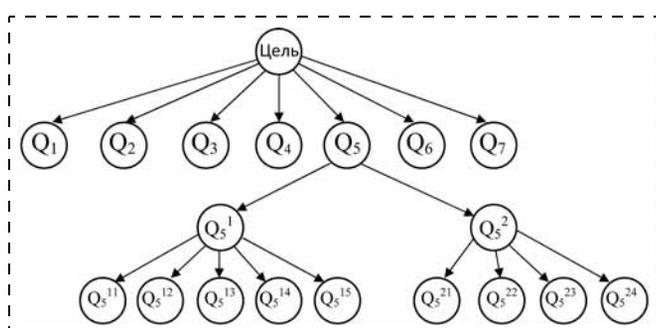
Необходимо выбрать рациональный (устраивающий ЛПП) вариант с точки зрения минимизации затрат.

1. Построим иерархию критериев для оценки предлагаемых альтернатив (см. рисунок).

Первый уровень иерархии — цель решения задачи — выбор проектного решения СНК.

Второй уровень — уровень базовых критериев Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub>, Q<sub>3</sub>, Q<sub>4</sub>, Q<sub>5</sub>, Q<sub>6</sub>, Q<sub>7</sub>, содержит два подуровня.

Первый подуровень — подуровень вложенных критериев критерия оценки электромагнитной со-



Иерархия критериев оценки проектного решения СНК

вместимости Q<sub>5</sub>. Этот критерий включает два подкритерия Q<sub>5</sub><sup>1</sup> и Q<sub>5</sub><sup>2</sup> — соответственно критерий оценки электромагнитного излучения и критерий электромагнитной помехоустойчивости.

Второй подуровень — подуровень частных критериев оценки электромагнитного излучения Q<sub>5</sub><sup>11</sup>, Q<sub>5</sub><sup>12</sup>, Q<sub>5</sub><sup>13</sup>, Q<sub>5</sub><sup>14</sup>, Q<sub>5</sub><sup>15</sup> и электромагнитной помехоустойчивости Q<sub>5</sub><sup>21</sup>, Q<sub>5</sub><sup>22</sup>, Q<sub>5</sub><sup>23</sup>, Q<sub>5</sub><sup>24</sup>.

2. Заполним кососимметричную матрицу сравнительной важности базовых критериев оценки качества проектного решения по блоку А (табл. 1) [3].

При заполнении таблицы проводится сравнительная оценка пар критериев по шкале, принятой в методе аналитических иерархий [3].

Значения элементов выбираются из ряда 1, 3, 5, 7, 9 в зависимости от сравнительной степени важности пар критериев.

Вычисляем цену каждого критерия W<sub>Qi</sub> по формуле

$$W_{Qi} = \sqrt[n]{Q_{i1} Q_{i2} \dots Q_{in}}; \quad (1)$$

где n — размерность матрицы парных сравнений критериев (табл. 1).

W<sub>Q1</sub> = 1,993, W<sub>Q2</sub> = 1,456, W<sub>Q3</sub> = 2,862, W<sub>Q4</sub> = 2,167, W<sub>Q5</sub> = 0,428, W<sub>Q6</sub> = 0,324, W<sub>Q7</sub> = 0,399.

Вычисляем сумму цен критериев W<sub>Qi</sub> = 8,92.

Вычисляем итоговые веса базовых критериев W<sub>Qi</sub> по формуле

$$W_{Qi}^* = \frac{W_{Qi}}{\sum_{i=1}^n W_{Qi}}, \quad (2)$$

W<sub>Q1</sub><sup>\*</sup> = 0,207, W<sub>Q2</sub><sup>\*</sup> = 0,151, W<sub>Q3</sub><sup>\*</sup> = 0,297, W<sub>Q4</sub><sup>\*</sup> = 0,225, W<sub>Q5</sub><sup>\*</sup> = 0,044, W<sub>Q6</sub><sup>\*</sup> = 0,034, W<sub>Q7</sub><sup>\*</sup> = 0,041.

Веса частных вложенных критериев рассчитываются аналогичным образом путем нормирования их значений с учетом веса критериев более высо-

Таблица 2

Q <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>
A <sub>1</sub>	1	1/3	1/6
A <sub>2</sub>	3	1	1/4
A <sub>3</sub>	6	4	1

кого уровня ( $W_{Q_5} = W_{Q_5}^1 + W_{Q_5}^2$ ). Так, для данного примера  $W_{Q_5}^1 = 0,321$ ,  $W_{Q_5}^2 = 0,107$ ,

$$W_{Q_5}^{*11} = 0,0074, W_{Q_5}^{*12} = 0,0069, W_{Q_5}^{*13} = 0,0066,$$

$$W_{Q_5}^{*14} = 0,0060, W_{Q_5}^{*15} = 0,0053,$$

и, соответственно,

$$W_{Q_5}^{*21} = 0,0021, W_{Q_5}^{*22} = 0,0032, W_{Q_5}^{*23} = 0,0029,$$

$$W_{Q_5}^{*24} = 0,0025.$$

Веса частных критериев приведены без расчетов.

3. Фиксируем критерии и вычисляем относительную ценность альтернатив по каждому критерию путем заполнения матриц сравнительной важности альтернатив A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub> по критериям Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub>, Q<sub>3</sub>, Q<sub>4</sub>, Q<sub>5</sub>, Q<sub>6</sub>, Q<sub>7</sub> (аналогично п. 1).

*Критерий Q<sub>1</sub>* (табл. 2).

Вычисляем цену каждой альтернативы  $V_{Q_i}$  аналогично формуле (1):

$$V_{A_1Q_1} = 0,38, V_{A_2Q_1} = 1,44, V_{A_3Q_1} = 2,88.$$

Сумма цен альтернатив  $V_{Q_1} = 4,70$ .

Вычисляем  $V_{Q_1}^*$  аналогично формуле (2):

$$V_{A_1Q_1}^* = 0,08, V_{A_2Q_1}^* = 0,31, V_{A_3Q_1}^* = 0,61.$$

*Критерий Q<sub>2</sub>* (табл. 3).

Таблица 3

Q <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>
A <sub>1</sub>	1	8	8
A <sub>2</sub>	1/8	1	5
A <sub>3</sub>	1/8	1/5	1

Вычисляем  $V_{Q_i}$ :

$$V_{A_1Q_2} = 4,00, V_{A_2Q_2} = 0,85, V_{A_3Q_2} = 0,29.$$

Сумма  $V_{Q_2} = 5,14$ .

Вычисляем  $V_{Q_2}^*$ :

$$V_{A_1Q_2}^* = 0,78, V_{A_2Q_2}^* = 0,17, V_{A_3Q_2}^* = 0,06.$$

*Критерий Q<sub>3</sub>* (табл. 4).

Таблица 4

Q <sub>3</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>
A <sub>1</sub>	1	1	8
A <sub>2</sub>	1	1	8
A <sub>3</sub>	1/8	1/8	1

Вычисляем  $V_{Q_i}$ :

$$V_{A_1Q_3} = 2,00, V_{A_2Q_3} = 2,00, V_{A_3Q_3} = 0,25.$$

Сумма  $V_{Q_3} = 4,25$ .

Вычисляем  $V_{Q_3}^*$ :

$$V_{A_1Q_3}^* = 0,47, V_{A_2Q_3}^* = 0,47, V_{A_3Q_3}^* = 0,06.$$

*Критерий Q<sub>4</sub>* (табл. 5).

Таблица 5

Q <sub>4</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>
A <sub>1</sub>	1	2	4
A <sub>2</sub>	1/2	1	2
A <sub>3</sub>	1/4	1/2	1

Вычисляем  $V_{Q_i}$ :

$$V_{A_1Q_4} = 2,00, V_{A_2Q_4} = 1,00, V_{A_3Q_4} = 0,5.$$

Сумма  $V_{Q_4} = 3,50$ .

Вычисляем  $V_{Q_4}^*$ :

$$V_{A_1Q_4}^* = 0,57, V_{A_2Q_4}^* = 0,29, V_{A_3Q_4}^* = 0,14.$$

*Критерий Q<sub>5</sub>*.

Вычисляем  $V_i$ :

$$V_{A_1Q_5} = 1,26, V_{A_2Q_5} = 0,63, V_{A_3Q_5} = 1,26.$$

Сумма  $V_{Q_5} = 3,14$ .

Вычисляем  $V_{Q_5}^*$ :

$$V_{A_1Q_5}^* = 0,40, V_{A_2Q_5}^* = 0,20, V_{A_3Q_5}^* = 0,40.$$

Ценность альтернатив по критерию Q<sub>5</sub> вычисляется с учетом вложенных критериев Q<sub>5</sub><sup>1</sup> и Q<sub>5</sub><sup>2</sup>, а также Q<sub>5</sub><sup>11</sup>, Q<sub>5</sub><sup>12</sup>, Q<sub>5</sub><sup>13</sup>, Q<sub>5</sub><sup>14</sup>, Q<sub>5</sub><sup>15</sup> и Q<sub>5</sub><sup>21</sup>, Q<sub>5</sub><sup>22</sup>, Q<sub>5</sub><sup>23</sup>, Q<sub>5</sub><sup>24</sup>. Матрицы попарного сравнения альтернатив по указанным критериям не приводятся, так как принцип их заполнения аналогичен.

Критерий  $Q_6$  (табл. 6).

Таблица 6

$Q_6$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
$A_1$	1	1	1/6
$A_2$	3	1	1/6
$A_3$	6	6	1

Вычисляем  $V_{Q_i}$ :

$$V_{A_1Q_6} = 0,55, V_{A_2Q_6} = 1,00, V_{A_3Q_6} = 3,00.$$

Сумма  $V_{Q_6} = 4,55$ .

Вычисляем  $V_{Q_6}^*$ :

$$V_{A_1Q_6}^* = 0,25, V_{A_2Q_6}^* = 0,22, V_{A_3Q_6}^* = 0,66.$$

Критерий  $Q_7$  (табл. 7).

Таблица 7

$Q_7$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
$A_1$	1	1	5
$A_2$	1	1	5
$A_3$	1/5	1/5	1

Вычисляем  $V_{Q_i}$ :

$$V_{A_1Q_7} = 1,71, V_{A_2Q_7} = 1,71, V_{A_3Q_7} = 0,34.$$

Сумма  $V_{Q_7} = 3,76$ .

Вычисляем  $V_{Q_7}^*$ :

$$V_{A_1Q_7}^* = 0,45, V_{A_2Q_7}^* = 0,45, V_{A_3Q_7}^* = 0,09.$$

Для заполнения таблиц сравнительной важности критериев и альтернатив по отдельным критериям может потребоваться привлечение группы экспертов. В этом случае целесообразно применение групповых методов поддержки принятия решения: метода минимального расстояния (если число альтернатив  $n \leq 10$ ) и метода ранжирования альтернатив [4].

4. Вычисляем итоговые веса каждого варианта проектного решения по блоку А по формуле

$$C_j = W_{Q_1}^* V_{A_jQ_1}^* + W_{Q_2}^* V_{A_jQ_2}^* + \dots + W_{Q_n}^* V_{A_jQ_n}^* \quad (3)$$

Здесь  $n$  — число базовых критериев оценки качества решения СНК;  $j = 1, 2, \dots, m$ , где  $m$  — число альтернативных проектных решений СНК.

$$C_1 = 0,207 \cdot 0,08 + 0,151 \cdot 0,78 + 0,297 \cdot 0,47 + 0,225 \cdot 0,57 + 0,044 \cdot 0,40 + 0,034 \cdot 0,25 + 0,041 \cdot 0,45 = 0,4469;$$

$$C_2 = 0,207 \cdot 0,31 + 0,151 \cdot 0,17 + 0,297 \cdot 0,47 + 0,225 \cdot 0,29 + 0,044 \cdot 0,20 + 0,034 \cdot 0,22 + 0,041 \cdot 0,45 = 0,3296;$$

$$C_3 = 0,207 \cdot 0,61 + 0,151 \cdot 0,06 + 0,297 \cdot 0,06 + 0,225 \cdot 0,14 + 0,044 \cdot 0,40 + 0,034 \cdot 0,66 + 0,041 \cdot 0,09 = 0,2284.$$

Таким образом, наиболее целесообразно выбрать альтернативу  $A_1$  — покупку блока А у фирмы F1.

Аналогичным образом принимаем решения по блокам В и С.

Предлагаемый подход к решению задачи автоматизации определения базовой структуры СНК и способов реализации блоков в условиях большого числа критериев (наряду с общепринятыми критериями оценки качества проектного решения СНК метод позволяет учесть целый ряд новых критериев, в частности, критерий электромагнитной совместимости блоков СНК и др.) дает возможность обоснованно выбрать компромиссный вариант проектного решения СНК.

#### Список литературы

1. Ларичев О. И., Зуев О. А., Гнеденко Л. С. Метод "ЗАПРОС" (Замкнутые Процедуры у Опорных Ситуаций) решения слабоструктурированных проблем выбора при многих критериях. Препр. М.: ВНИИСИ, 1978. 7 с.
2. Tversky A. Intransitivity of preferences // Psychol. Rev. 1969. Vol. 76, N 1. P. 31–49.
3. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Логос, 2002. 392 с.
4. Васильев Ф. Н., Вишнеков А. В., Феропонтова Е. С. Методы поддержки принятия групповых решений // Качество и ИПИ-технологии. 2007. № 2. С. 51–55.
5. Redoute J.-M., Steyaert M. EMC of Analog Integrated Circuits, Analog Circuits and Signal Processing. Hardcover: Springer, 2010. 243 p.
6. Шумахер У. Полупроводниковая электроника. URL: [http://www.infineon.com/cms/en/product/promopages/Infineon\\_n\\_Russian\\_Semiconductor\\_Book\\_/Semiconductor\\_book\\_ru.html](http://www.infineon.com/cms/en/product/promopages/Infineon_n_Russian_Semiconductor_Book_/Semiconductor_book_ru.html)

**Averin I. A., Anoshkin Y. V., Pecherskaja R. M. Research of Degradation Processing of Output Parameters Tensoresistive Structures . . . . . 2**

The mechanisms of causing degradation of output parameters tensoresistive structures in time. We have developed a technique for determining the concentration of oxygen in the tensoresistive structures using Fourier transform spectroscopy and stabilization model of the output parameters of the tensoresistive structures based on chromium-nickel alloys.

**Keywords:** resistive structure, process degradation, FTIR spectrometer, models, concentration resistance

**Prinz A. V. Fabrication of Vertical Semiconductor Microtubes Arrays . . . . . 5**

New methods of fabrication of vertical semiconductor roll-up microtubes arrays were devised. The buoyancy force in liquid was used as an addition to elastic force for the lifting roll-up microtubes. The fabricated vertically aligned microtube arrays can be considered as a universal platform for delivering biomolecules into living cell arrays.

**Keywords:** semiconductors nanotubes, microtubes, microinjection

**Baranochnikov M. L., Leonov A. V., Malykh A. A., Mordkovich V. N., Murashev V. N., Pazhin D. M. The External Actions Sensor with Frequency output on the Basis of MISIM Field Effect Transistor with Build — in Channel . . . . . 8**

There was demonstrated the possibility to use MISIM FET with build — in channel as a sensitive element of external actions (such as magnetic field, temperature, radiation) sensor with frequency output. The sensor includes the oscillator and mentioned above sensitive element as a variable load which is function of actions intensity. The oscillator may be organized on the basis of conventional ICs or on current self oscillations in sensitive element which arise on subbreakdown part of current — voltage characteristics. The sensors are fabricated on the base of silicon on insulator technology.

**Keywords:** sensor, action to frequency converter, silicon on insulator

**Ruban O. A., Pushkarev S. S., Galiev G. B., Klimov E. A., Ponomarev D. S., Habibullin R. A., Maltsev P. P. Metamorphic Nanoheterostructures InGaAs/InAlAs on GaAs Substrate for Terahertz Electronics . . . . . 12**

Metamorphic InGaAs/InAlAs/GaAs nanoheterostructures with different design of metamorphic buffer (MB) have been investigated. It was established that introducing of 30-period superlattices (SL) into MB leads to mobility increasing up to 36 % in comparison to the sample without SL and keeps a high quality of the structures. Root square mean roughness was also derived from AFM measurements to estimate a structural quality.

**Keywords:** THz devices, THz radiation, metamorphic buffer, nanoheterostructures, molecular-beam epitaxy

**Troitskiy A. A., Berezin V. M., Lukashev V. S. Electrical and Optical Properties of Thin Carbon Films Obtained by Electron-Beam Evaporation . . . . . 15**

Thin carbon films (up to 30 nm thick) were obtained by the electron-beam evaporation technique of a graphite sample. Electrical surface resistance and light transparency ( $\lambda = 560$  nm) of carbon samples were measured. Dependencies of these characteristics on film thickness were found out. Results were compared to results of other works.

**Keywords:** graphene, carbon, electron-beam evaporation, carbon films, thin films, transparency

**Pustovalov A. A., Tsvetkov L. A. Production of the High-Enriched Nickel-63 Radionuclide is the Basic Condition for Development of High Efficient Beta-Voltaic Nuclear Batteries . . . . . 19**

The paper examines and justifies the existing possibilities for producing the high-enriched (80...85 %) nickel-63 radionuclide in industrial scale with use of the real technologies and operating enterprises of the domestic industry.

Nickel-63 is an artificial radionuclide, the pure beta-emitter with average energy of beta radiation 18 KeV that allows to create on its basis tiny and safe beta-voltaic nuclear batteries of a mikromilli-watt power range with service life not less than 50 years for application in various devices and microsystem equipment.

**Keywords:** radionuclide, nickel-63, beta-radiation nuclear battery, centrifugal separation, beta-voltaic effect, semiconductor, service lifetime

**Kolpakov A. J., Poplavskiy A. I., Galkina M. E., Tokarev D. A., Belyaeva A. O., Gerus J. V.** *Influence of Vacuum Annealing on the Internal Stresses in Carbon Coatings Formed at Different Orientations of the Substrate Relative to the Flow Axis Pulsed Carbon Plasma* . . . . . 25

Influence of vacuum annealing on the value of the internal stresses in the amorphous diamond-like carbon coatings deposited by pulsed vacuum-arc method at two different orientations of the substrate relative to the axis of carbon plasma flow (DLC-I, DLC-II) was investigated. The results can be used in selecting the heat treatment of these coatings to reduce internal stresses. This will expand the area of application of the DLC coatings in micromechanics and MEMS.

**Keywords:** internal stresses, amorphous diamond-like carbon coatings, annealing, defects

**Voitsekhovskiy A. V., Kulchitskiy N. A., Melnikov A. A., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M.** *Photodetectors and Focal Plane Arrays for the Spectral Range 8–14 Micron on Cadmium-Mercury Tellurides Solid Solutions* . . . . . 29

The analysis of the current state and trends of photodetectors and focal plane array for the spectral range 8–14 micron on solid solutions HgCdTe photodiodes was carry out.

**Keywords:** photodetector, focal plane array, solid solutions HgCdTe

**Masalskiy N. V.** *Characteristics of the Submicron Photonic Phase Modulator on "Silicon on Isolator" Structure* . . . . . 38

Perspective approach for implementation of wideband optical modulation is discussed. On the basis of numerical solutions phase modulation characteristics of photon modulators executed on the basis of technical process "silicon on insulator" are probed. Simulation results will well be agreed with the experimental data. On the basis of numerical calculations it is shown that the achievable band of modulation makes more than 100 GHz.

**Keywords:** silicon photonic, waveguide SOI structure, wideband phase shift modulation

**Mukhurov N. I., Efremov G. I., Zhvavyi S. P.** *Electrostatic Micro Switches. Part 1. Closing Micro Switches of Parallel-Sided Structures* . . . . . 42

Theoretical bases are considered and calculations of parameters of electrostatic closing micro switches of a are carried out. The design procedure is applied in view of equality on sizes of active electrostatic and reaction mechanical forces with division in a working cycle of parameters on constants (a constructive constant) and variables (base function) components. Formulas of effective calculation of critical parameters are received.

**Keywords:** electrostatic closing micro switches, parallel-sided structure, calculated formulas of critical parameters

**Vishnekov A. V., Erohin V. V.** *Systems-on-Chip Design: Risks and Solutions* . . . . . 49

System-on-a-chip (SoC) multicriteria design automated selection method based on the decision making theory is discussed in the article. Special attention is paid for SoC projects hierarchy criteria analysis solutions including Electro Magnetic Compatibility. The alternative design decision values calculation for SoCs using proposed technique is overviewed.

**Keywords:** project design, decision-maker person, system-on-chip, the design solutions quality criteria, IP-block

**For foreign subscribers:**

*Journal of "NANO and MICROSYSTEM TECHNIQUE" (Nano- i mikrosistemnaya tekhnika, ISSN 1813-8586)*

*The journal bought since november 1999.*

*Editor-in-Chief Professor Petr P. Maltsev,*

*Deputy of Editor-in-Chief Professor Victor V. Luchinin (Russia),*

*Deputy Editor-in-Chief Professor Michael S. Shur (USA)*

**ISSN 1813-8586.**

**Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(499) 269-5510.**

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромьинский пер., 4. Телефон редакции журнала (499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru  
Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства  
в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.  
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Дизайнер Т. Н. Погорелова. Технический редактор Е. М. Патрушева. Корректор Е. В. Комиссарова

Сдано в набор 16.08.2013. Подписано в печать 25.09.2013. Формат 60×88 1/8. Заказ МС1013.

Цена договорная

Оригинал-макет ООО «Авансд солюшнз».

Отпечатано в ООО «Авансд солюшнз». 105120, г. Москва, ул. Нижняя Сыромятничская, д. 5/7, стр. 2, офис 2.