

# ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ



НИИ ТОЧНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ



МБУ ТМ-Магна



МБУ ТМ-ТИС



МБУ ТМ-Отжиг



МБУ ТМ  
Плазма РИТ



МБУ ТМ  
Изофаз CVD,  
МБУ ТМ  
Плазма ПХТ



МБУ ТМ  
Изофаз CVD ICP,  
МБУ ТМ  
Плазма ПХТ ICP

К статье «Новое технологическое оборудование  
для инновационных технологий микро-, нано- и радиоэлектроники»

## 3(91) 2011

# ОДИННАДЦАТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА



# ЭЛЕКТРОНИКА ЭНЕРГЕТИКА

## 14-16 СЕНТЯБРЯ 2011

ОДЕССА МОРВОКЗАЛ

ОРГАНИЗАТОР  
Центр выставочных технологий  
Тел.: (0482) 359 992  
E-mail: [elektro@expo-odessa.com](mailto:elektro@expo-odessa.com)  
<http://www.expo-odessa.com>



## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

### «ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ»

Выходит один раз в 2 месяца

Регистрационный номер КВ 13418-2302ПР

Зарегистрирован в ВАК Украины по разделам «Физико-математические науки», «Технические науки»

Реферируется в УРЖ «Джерело» (г. Киев) и в реферативном журнале ВИНТИ (г. Москва)

### ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

В Украине

Отделения связи. «Каталог видань України». Индекс 23785.

Подписное агентство «Идея», [www.idea.com.ua](http://www.idea.com.ua). Индекс 11146.

Подписное агентство «KSS», [www.kss.kiev.ua](http://www.kss.kiev.ua). Индекс 20363.

В России

Отделения связи. Каталог «Газеты и журналы». Индекс 71141.

В Белоруссии

Отделения связи. Каталог «Издания стран СНГ».

Индекс 71141.

В редакции «ТКЭА» можно подписаться с любого номера.



Адрес редакции: Украина, 65044, г. Одесса, а/я 17.

E-mail: [tkea@optima.com.ua](mailto:tkea@optima.com.ua), web-сайт: [www.tkea.com.ua](http://www.tkea.com.ua),

тел. +38 (048)728-18-50, 728-11-89,

тел./факс 728-49-46.

Редакция: Е. А. Тихонова, А. А. Ефименко, А. А. Алексеева,

Н. М. Колганова, М. Г. Микулинская.

Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корецкая.

Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.

Номер выпущен при поддержке

НИИ «Орион», (г. Киев),

НПП «Карат» (г. Львов),

ЦКБ «Ритм» (г. Черновцы)

Формат 60x84 1/8. Печать офсетная.

Печ. л. 6,5+1,0. Уч.-изд. л. 7,0. Тираж 500 экз. Заказ № 175.

Издательство «Политехперіодика»

(65044, г. Одесса-44, а/я 17).

Отпечатано в типографии издательства «ART-V»

(65091, г. Одесса, ул. Комитетская, 24а).



**ТЕХНОЛОГИЯ  
И  
КОНСТРУИРОВАНИЕ  
В  
ЭЛЕКТРОННОЙ  
АППАРАТУРЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2011 № 3 (91)

Год издания 35-й

**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР**

*К.т.н. В. М. Чмиль*

**РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**

*Д.т.н. Н. М. Вакив* (г. Львов)  
*Д.т.н. В. Н. Годованюк* (г. Черновцы)  
*К.т.н. А. А. Дашковский* (г. Киев)  
*Н. В. Конциц* (г. Киев)  
*Д.ф.-м.н. В. Ф. Мачулин* (г. Киев)  
*Д.т.н. Г. А. Оборский* (г. Одесса)  
*Е. А. Тихонова* (г. Одесса)

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

*Д.т.н. С. Г. Антощук* (г. Одесса)  
*Д.т.н. А. А. Ащеулов* (г. Черновцы)  
*Д.т.н. В. В. Баранов* (г. Минск)  
*К.т.н. Э. Н. Глушеченко*,  
зам. гл. редактора (г. Киев)  
*Д.т.н. В. В. Данилов* (г. Донецк)  
*К.т.н. И. Н. Еримичой*,  
зам. гл. редактора (г. Одесса)  
*К.т.н. А. А. Ефименко*,  
ответственный секретарь (г. Одесса)  
*Д.ф.-м.н. Д. В. Корбутяк* (г. Киев)  
*Д.т.н. С. Ю. Лузин* (г. С.-Петербург)  
*Д.т.н. В. П. Малахов* (г. Одесса)  
*К.т.н. И. Л. Михеева* (г. Киев)  
*Д.т.н. И. Ш. Невлюдов* (г. Харьков)  
*Д.т.н. Ю. Е. Николаенко* (г. Киев)  
*К.ф.-м.н. А. В. Рыбка* (г. Харьков)  
*К.т.н. В. В. Рюхтин* (г. Черновцы)  
*Д.ф.-м.н. М. И. Самойлович* (г. Москва)  
*Д.т.н. В. С. Ситников* (г. Одесса)  
*Д. т. н. З. Стевич* (г. Белград)  
*Д.х.н. В. Н. Томашик* (г. Киев)  
*Д.т.н. В. М. Шокало* (г. Харьков)  
*Д.ф.-м.н. О. И. Шпотюк* (г. Львов)

**УЧРЕДИТЕЛИ**

Министерство промышленной политики  
Украины  
Институт физики полупроводников  
им. В. Е. Лашкарёва  
Научно-производственное  
предприятие «Сатурн»  
Одесский национальный  
политехнический университет  
Издательство "Политехпериодика"

Одобрено к печати Ученым советом ОНПУ  
(Протокол № 10 от 21.06 2011 г.)

**СОДЕРЖАНИЕ**

**Техническая политика**

Новый подход к созданию устройств с энергонезависимой памятью на основе Si-MOP-транзисторов. *Гуляев Ю. В., Ждан А. Г., Чучева Г. В.* 3

**Новые компоненты для электронной аппаратуры**

Моделирование электротоковых микрореле. *Мухуров Н. И., Ефремов Г. И., Жвавый С. П.* 6

**Электронные средства: исследования, разработки**

Выбор оптимальных параметров некоторых узлов частотомеров СВЧ-диапазона. *Криваль И. И., Скрипнюк А. И., Проценко В. А., Марьенко А. В.* 10

Скоростные уравнения экситонного лазера. *Гаркавенко А. С.* 14

Анизотропный термоэлемент в режиме генерации эдс и тока. *Анатычук Л. И., Прибыла А. В.* 17

**Сенсоэлектроника**

Индуктивный негасенсор. *Войцеховская Е. В., Лищинская Л. Б., Лазарев А. А.* 20

**Функциональная микро- и нанoeлектроника**

Разработка конструкции и технологии изготовления комплементарных транзисторов для радиационно стойких ИС. *Горбань А. Н., Кравчина В. В.* 23

Кремниевый  $p-i-n$ -фотодиод с малым темновым током. *Добровольский Ю. Г., Ащеулов А. А.* 27

**Обеспечение тепловых режимов**

Теплотехнические характеристики радиатора для эффективных систем охлаждения радиоэлектронной техники. *Руденко А. И., Кравец В. Ю., Зарипов В. К.* 32

**Технологические процессы и оборудование**

Лазерная абляция и фотостимулированная пассивация поверхности кристаллов  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ . *Загоруйко Ю. А., Коваленко Н. О., Христьян В. А., Федоренко О. А., Герасименко А. С., Добротворская М. В., Матейченко П. В.* 35

Высокочувствительная установка для оценки изменения показателя преломления водных растворов. *Подкамень Л. И., Гавриляк М. С.* 37

Новое технологическое оборудование для инновационных технологий микро-, нано- и радиоэлектроники. *Одинокое В. В., Павлов Г. Я.* 41

**Метрология. Стандартизация**

Погрешности при измерении характеристик рентгеновских установок. *Душкин С. А., Иванский В. Б., Куров А. М., Одинец В. А., Орбинский А. Н.* 44

**Аннотации к статьям номера** 50

**Новые книги** 9, 31

**Конференции** 13

#### Технічна політика

Новий підхід до створення пристроїв з енергонезалежною пам'яттю на основі Si-MOP-транзисторів. Гуляєв Ю. В., Ждан О. Г., Чучева Г. В. (3)

#### Нові компоненти для електронного обладнання

Моделювання електротокових мікрореле. Мухуров Н. І., Єфремов Г. І., Жвавий С. П. (6)

#### Електронні засоби: дослідження, розробки

Вибір оптимальних параметрів деяких вузлів частотомірів НВЧ-діапазону. Криваль І. І., Скрипнюк О. І., Проценко В. О., Мар'єнко А. В. (10)

Швидкісні рівняння екситонного лазера. Гаркавенко О. С. (14)

Анізотропний термоелемент в режимі генерації ерс та струму. Анатичук Л. І., Прибила А. В. (17)

#### Сенсоелектроніка

Індуктивний негасенсор. Войцеховська О. В., Ліщинська Л. Б., Лазарєв О. О. (20)

#### Функціональна мікро- і наноелектроніка

Розробка конструкції та технології виготовлення комплементарних транзисторів для радіаційно стійких ІС. Горбань А. Н., Кравчина В. В. (23)

Кремнієвий p-i-n-фотодіод з малим темновим струмом. Добровольський Ю. Г., Ащеулов А. А. (27)

#### Забезпечення теплових режимів

Теплотехнічні характеристики радіатора для ефективних систем охолодження радіоелектронної техніки. Руденко А. І., Кравець В. Ю., Зарипов В. К. (32)

#### Технологічні процеси та обладнання

Лазерна абляція та фотостимульована пасивація поверхні кристалів  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ . Загоруйко Ю. А., Коваленко Н. О., Христ'ян В. А., Федоренко О. О., Герасименко А. С., Добротворська М. В., Матейченко П. В. (35)

Високочутлива установка для оцінки зміни показника заломлення водних розчинів. Підкамінь Л. Й., Гавриляк М. С. (37)

Нове технологічне обладнання для іновативних технологій мікро-, нано- та радіоелектроніки. Одиноків В. В., Павлов Г. Я. (41)

#### Метрологія, стандартизація

Похибки при вимірюванні характеристик рентгенівських установок. Душкін С. О., Іванський В. Б., Куров О. М., Одинець В. О., Оробінський А. Н. (44)

#### Technical policy

The new approach to the creation of the nonvolatile memory based on Si-MOS-transistors. Gulyaev Yu. V., Zhdan A. G., Chucheva G. V. (3)

#### New components for the electronic equipment

The electrocurrent microrelay modelling. Mukhurov N. I., Yefremov G. I., Zhvavyi S. P. (6)

#### Electronic facilities: investigations, development

Choosing the optimal parameters of some frequency meter's units of microwave band. Krival I. I., Skrypnyuk A. I., Protsenko V. A., Maryenko A. V. (10)

Exciton laser rate equations. Garkavenko A. S. (14)

Anisotropic thermoelement in emf and current generation mode. Anatychuk L. I., Prybyla A. V. (17)

#### Sensoelectronics

Inductive negasensor. Voytschekhovskaya Ye. V., Lishchynskaya L. B., Lazarev A. A. (20)

#### Functional micro- and nanoelectronics

Development of a construction and manufacturing techniques of complementary transistors for the radiation tolerant integrated circuits. Gorban A. N., Kravchina V. V. (23)

Silicic p-i-n-photodiode with small dark current. Dobrovolskiy Yu. G., Ashcheulov A. A. (27)

#### Ensuring of thermal modes

Heat engineering characteristics of the radiator for effective electronic equipment cooling systems. Rudenko A. I., Kravetz V. Yu., Zaripov V. K. (32)

#### Technological processes and equipment

Laser ablation and photostimulated passivation of the surface of  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  crystals. Zagoruiko Yu. A., Kovalenko N. O., Khristyan V. A., Fedorenko O. A., Gerasimenko A. S., Dobrotvorskaya M. V., Mateychenko P. V. (35)

High-sensitivity setup for estimation of water solutions refraction index change. Podkamen L. I., Gavrylyak M. S. (37)

The new process equipment for innovative technologies of micro-, nano- and radio electronics. Odiokov V. V., Pavlov G. Ya. (41)

#### Metrology, standardization

The measurement errors of X-ray devices features. Dushkin S. A., Ivanskiy V. B., Kurov A. M., Odinets V. A., Orobinskiy A. N. (44)

Акад. РАН, д. ф.-м. н. Ю. В. ГУЛЯЕВ, д. ф.-м. н. **А. Г. ЖДАН**,  
д. ф.-м. н. Г. В. ЧУЧЕВА

Россия, Фрязинский филиал ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН  
E-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

Дата поступления в редакцию  
09.11.2010 г.

Оппонент к. т. н. В. В. ХЛОПОВ  
(ЦНИИРТИ им. Берга, г. Москва)

## НОВЫЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ УСТРОЙСТВ С ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТЬЮ НА ОСНОВЕ Si-МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

*Продemonстрирована возможность реализации на полевых транзисторах с изолированным затвором электронно-ионной памяти, которая может представлять интерес для разработки Flash-памяти нового поколения.*

Хорошо известно, что в современной микроэлектронике используется несколько типов полупроводниковых устройств памяти, различающихся по быстродействию, объему, необходимости питания, габаритам и другим характеристикам. Многочисленные виды этих микросхем с различными параметрами можно разделить на две группы по отношению памяти к наличию питания, т. е. сохраняются ли записанные данные при выключенном питании или не сохраняются. Другой достаточно важной характеристикой является возможность доступа по любому адресу (т. е. к произвольной ячейке). Среди энергонезависимых типов памяти с произвольным доступом сейчас лидирует кремниевая Flash-память (NAND Flash-память), где в качестве элементов используются МОП-транзисторы с «плавающим» затвором. Однако заменить все существующие оптические и магнитные накопители этим типом носителя невозможно, поскольку в силу своего принципа действия Flash-память допускает лишь ограниченное количество циклов стирания и записи.

Решение данной проблемы заключается в поиске других принципов хранения и записи информации в существующих МОП-транзисторах, которые позволяли бы осуществлять неограниченное число циклов записи/перезаписи информации. Перспективным здесь может быть использование эффектов переноса ионов в подзатворном диэлектрике и их взаимодействия с каналом МОП-транзистора [1, 2].

В настоящей работе рассматриваются возможности реализации принципов Flash-памяти на основе эффектов электронно-ионного взаимодействия в кремниевых полевых транзисторах с изолированным затвором.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №08-07-00360-а, грант №09-07-13594-офи\_ц), и при частичном финансировании по программе фундаментальных исследований Президиума РАН №21 «Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов».

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для эксперимента были выбраны транзисторы с толщиной термического подзатворного оксида  $h=1000$  Å, шириной электродов исток/сток  $W=1$  мм, расстоянием между ними  $L=10$  мкм. В [2] было показано, что изменения электрофизических характеристик транзисторов в результате ионной поляризации диэлектрика в режиме джоулева разогрева прибора током стока сохраняются при комнатной температуре в течение длительного времени. Продemonстрируем возможность записи/перезаписи информации на  $n$ -канальных Si-МОП-транзисторах при стандартных условиях работы современных запоминающих устройств.

Измерения проводили при комнатной температуре на компьютеризированной установке [3]. До поляризационной обработки оксида регистрировалась зависимость тока стока  $I$  от потенциала затвора  $V_g$  при напряжении на стоке  $V_d=0,1$  В (рис. 1, кривая 1). Затем при заданном потенциале затвора  $V_g=20$  В подавалось напряжение на сток  $V_d=12$  В в течение 1 мин. После такой обработки регистрировалась зависимость тока стока  $I$  от напряжения затвора  $V_g$  (рис. 1, кривая 2). Сопоставление полученных эксперименталь-

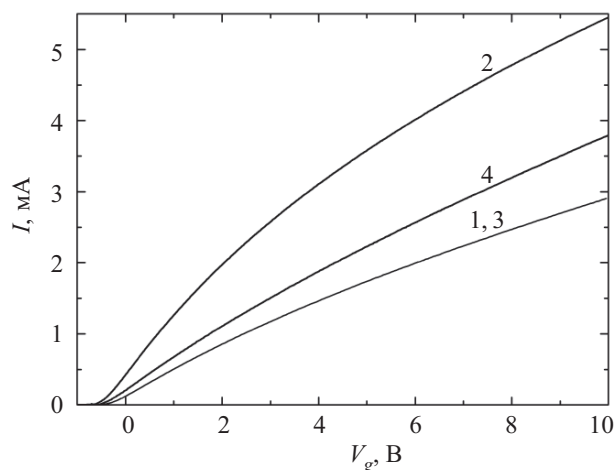


Рис. 1. Зависимость тока стока  $I$  от потенциала затвора  $V_g$  при напряжении на стоке  $V_d=0,1$  В и температуре  $T=293$  К: 1 — до поляризации; 2 — после поляризации оксида (запись информации); 3 — после стирания информации; 4 — промежуточное состояние

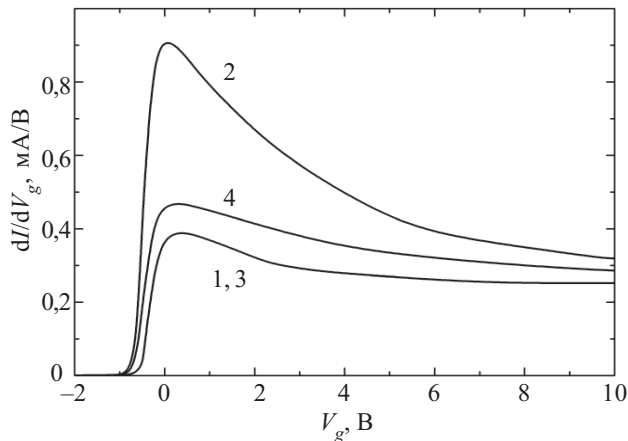


Рис. 2. Зависимость производной  $dI/dV_g$  от потенциала затвора  $V_g$  для кривых, представленных на рис. 1 (нумерация та же)

ных кривых показывает, что поляризация оксида сопровождается существенным увеличением тока стока и крутизны характеристики и приводит к небольшому сдвигу порогового напряжения транзистора.

На рис. 2 представлены зависимости производных  $dI/dV_g$  от потенциала затвора  $V_g$ , характеризующие эффективную подвижность электронов  $\mu^*$  в  $n$ -канале («подвижность эффекта поля»). Эти кривые получены численным дифференцированием кривых 1 и 2 рис. 1 с применением процедуры сглаживания по адаптивному алгоритму Тихонова [4].

Согласно [5], эффективная подвижность электронов определяется как

$$\mu^* = \frac{1}{C_i} \frac{d\sigma_s(V_g)}{dV_g},$$

где  $C_i = \epsilon_0 \epsilon_i / h = 3,448 \cdot 10^{-8}$  Ф/см<sup>2</sup> — удельная «емкость оксида»;

$\epsilon_0, \epsilon$  — диэлектрическая проницаемость вакуума и оксида, соответственно;

$\sigma_s$  — удельная поверхностная проводимость инверсионного канала,  $\sigma_s = IL/(WV_d)$ .

Эффективная подвижность электронов  $\mu^*$  для точек максимума кривых 1 и 2 на рис. 2 —  $\mu_{m1}^*$  и  $\mu_{m2}^*$  составляет соответственно 1130 и 2667 см<sup>2</sup>/(В·с) ( $V_d = 0,1$  В), т. е. после поляризации оксида максимальное значение  $\mu^*$  возрастает примерно в 2,3 раза. Пороговое напряжение транзистора  $V_{th}$  (кривые 2 на рис. 1 и 2) сдвигается в сторону отрицательных значений  $V_g$  на величину  $\Delta V_{th} = 0,2$  В. Значение  $V_{th}$  определялось линейной экстраполяцией до пересечения с осью  $V_g$  кривых зависимости  $I(V_g)$ , измеренной при малых  $V_g$  [5] (рис. 3). Отметим, что кривая 2 на рис. 1 соответствует режиму «запись информации».

После проведенных опытов часть транзисторов с «записанной информацией» оставляли на длительное время в лабораторных условиях. Как оказалось, записанная информация может храниться годами. Другая часть приборов подвергалась исследованиям, направленным на поиск оптимального режима стирания информации. Для этого значения напряжения на затворе, стоке и время выдержки варьировали

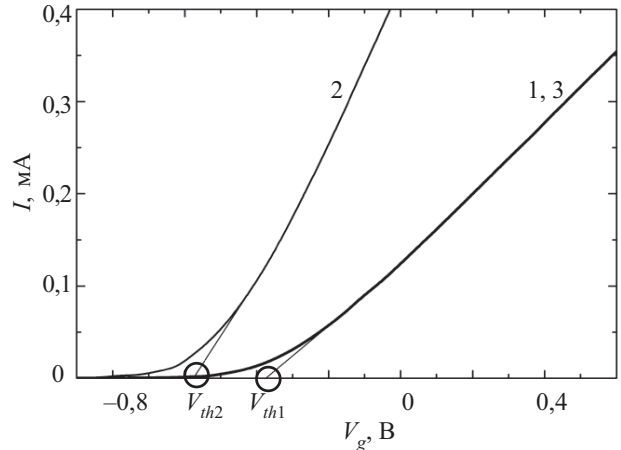


Рис. 3. Иллюстрация процедуры определения порогового напряжения транзистора  $V_{th}$  (рис. 1, кривые 1, 2) ( $V_{th1} \approx -0,3$  В;  $V_{th2} \approx -0,5$  В)

в широком диапазоне. Эксперименты проводили следующим образом: вначале на затвор и сток прикладывалось напряжение, соответствующее условиям «записи», затем на затвор скачком подавали отрицательное напряжение и поддерживали его определенное время при неизменном значении  $V_d$ . Был найден оптимальный режим, результат которого демонстрирует кривая 3 на рис. 1, совпадающая с кривой 1 ( $V_g = -20$  В, время выдержки 1 мин).

Для сравнения рассмотрим принцип работы Flash-памяти [6]. В простейшем случае каждая ячейка хранит один бит информации и состоит из одного полевого транзистора со специальной электрически изолированной областью («плавающим» затвором), способной хранить заряд многие годы. Наличие или отсутствие заряда кодируется одним битом информации. При записи заряд перемещается на «плавающий» затвор одним из двух способов, который зависит от типа ячейки: методом инжекции «горячих» электронов или туннелированием электронов. Стирание содержимого ячейки (снятие заряда с «плавающего» затвора) связано с туннелированием. Как правило, наличие заряда на транзисторе понимается как логический «0», а его отсутствие — как логическая «1». Поведение транзистора зависит от количества электронов на «плавающем» затворе. «Плавающий» затвор играет ту же роль, что и конденсатор в устройствах динамической памяти с произвольным доступом (DRAM), т. е. хранит запрограммированное значение. Во Flash-памяти эти два состояния различаются по величине заряда, перемещенного на «плавающий» затвор транзистора. Многие компании начали выпуск микросхем Flash-памяти, в которых одна ячейка хранит два бита. Технология хранения двух и более битов в одной ячейке получила название MLC (multilevel cell — многоуровневая ячейка). В технологии MLC используется аналоговая природа ячейки памяти. В отличие от «обычной» Flash-памяти, MLC способна различать более двух величин зарядов, перемещенных на «плавающий» затвор, и, соответственно, большее число состояний. При этом каждому состоянию в соответствие ставится определенная комбинация значений битов. Во время записи на Flash-



памяти помещается количество заряда, соответствующее необходимому состоянию. От величины заряда на «плавающем» затворе зависит пороговое напряжение транзистора, которое можно измерить при чтении и определить по нему записанное состояние, а значит и записанную последовательность битов.

Полученные результаты экспериментов с *n*-канальными Si-МОП-транзисторами полностью соответствуют схеме работы Flash-памяти. В нашем случае роль «плавающего» затвора играют положительные ионы, находящиеся у границы раздела «оксид—кремний». «Размещение» электронов на ионах (в результате чего возникают нейтральные ассоциаты [7, 8], т. е. ион+электрон+деформация решетки SiO<sub>2</sub>), как и их уход, происходит за счет туннельных переходов носителей заряда между разрешенной зоной полупроводника и связанными с ионами локализованными состояниями. Поскольку ионная поляризация оксида сопровождается увеличением тока стока и крутизны характеристики транзистора в два и более раза (рис. 1, 2, а также [1, 2]), запись, чтение и стирание информации можно осуществлять как с помощью сдвига порогового напряжения транзистора, так и изменением тока стока и крутизны. По-видимому, предложенная «ячейка памяти» может находиться не в двух состояниях — «0» или «1», а еще и в промежуточных, т. е. вести себя аналогично многоуровневой ячейке MLC (рис. 1, кривая 4). Таким образом, за счет варьирования значений напряжения затвора, потенциала стока и продолжительности токовой нагрузки (которая определяется размерами транзистора) можно изменять записанные состояния в ячейке памяти, что и создает основы для разработки приборов Flash-памяти нового поколения.

Из работ по исследованию эффектов электронно-ионного взаимодействия в Si-МОП-структурах [1, 2, 7, 8] следует, что по сравнению с традиционной Flash-памятью память, построенная на основе ионной поляризации транзистора, более долговечна, что повышает надежность запоминающих устройств. Запись может храниться гораздо дольше, т. к. электрону «невыгодно» покидать нейтральный ассоциат. В случае же типовой Flash-памяти электроны со временем могут уходить с «плавающего» затвора транзистора за счет туннельного перехода («просачиваться»). Вследствие миниатюризации ячеек памяти данный эффект будет происходить быстрее, а соответственно и потеря данных будет происходить раньше. Запись и стирание информации происходит в режиме туннелирования Фаулера–Нордгейма, что в итоге приводит к полемому повреждению изолирующего слоя [9]. В нашем случае поля в оксиде намного меньше и повреждения не происходит.

Анализ взаимодействия подвижных частиц в диэлектрическом слое [10] показал, что при концентрации ионов менее  $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  латерального распада системы нейтральных ассоциатов не происходит. В настоящее время имеются широкие возможности выбора диэлектрика и методов введения подвижных ионов в оксид (обработка образцов солями соответствующих элементов, ионная имплантация, нанесение требуемого элемента методом испарения в вакууме и т. п.). Из всего сказанного следует и еще одно преимущество рассматриваемого подхода к созданию устройств памяти — возможность восстановления конфигурации систем путем деполяризации и повторной ионной поляризации изолирующих слоев. Отметим и возможность повышения подвижности электронов в канале инверсии при ионной поляризации подзатворного оксида. Это явление представляет значительный интерес в отношении субмикронных полевых транзисторов, быстродействие которых в результате такой простой обработки должно возрастать.

## Выводы

Таким образом, показана возможность реализации устройств долговременной перестраиваемой электронно-ионной памяти с произвольным доступом на кремниевых полевых транзисторах с изолированным затвором. Запись и стирание информации производят электротермическим способом. Простота варьирования режима записи, перезаписи, стирания за счет подбора значений напряжения на затворе, стоке и продолжительности токовой нагрузки позволяет в существенных пределах изменять базовые характеристики ячеек памяти. Полученные результаты дают основания полагать, что по сравнению с традиционной кремниевой Flash-памятью такое запоминающее устройство будет более надежно и долговечно.

## ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ.

1. Гуляев Ю. В., Ждан А. Г., Чучева Г. В. Увеличение подвижности электронов в инверсионном канале Si-МОП-транзистора при ионной поляризации подзатворного оксида // Физика и техника полупроводников. — 2007. — Т. 41, № 3. — С. 357—360. [Gulyaev Yu. V., Zhdan A. G., Chucheva G. V. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2007. Vol. 41, N 3. P. 357]
2. Ждан А. Г., Нарышкина В. Г., Чучева Г. В. Автокоррекция характеристик полевых транзисторов в режиме спонтанной объемно-зарядовой ионной поляризации подзатворного оксида // Физика и техника полупроводников. — 2009. — Т. 43, № 5. — С. 705—707. [Zhdan A. G., Naryshkina V. G., Chucheva G. V. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2009. Vol. 43, N 5. P. 705]
3. Гольдман Е. И., Ждан А. Г., Чучева Г. В. Определение коэффициентов ионного переноса в диэлектрических слоях на поверхности полупроводников по динамическим вольт-амперным характеристикам деполяризации // Приборы и техника эксперимента. — 1997. — № 6. — С. 110—115. [Gol'dman E. I., Zhdan A. G., Chucheva G. V. // Pribory i tekhnika eksperimenta. 1997. N 6. P. 110]
4. Гуляев Ю. В., Ждан А. Г., Приходько В. Г. Применение метода регуляризации Тихонова к задачам спектроскопии локализованных электронных состояний в твердых телах / Препринт ИРЭ РАН. Москва. — 1984. — № 46 [Gulyaev Yu. V., Zhdan A. G., Prihod'ko V. G. / Preprint IRE RAN. Moskva. 1984. N 46.]
5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. — М.: Мир, 1984. [Zi S. M.: Mir, 1984]
6. Наконечный А. Энциклопедия flash-памяти. [http://www.akcent.ru/index.phtml?parent\\_id=9841](http://www.akcent.ru/index.phtml?parent_id=9841) [Nakonechnyi A. Entsiklopediya flashpamyati]
7. Гольдман Е. И., Ждан А. Г., Чучева Г. В. Электропроводность изолирующего слоя на поверхности полупроводника, обусловленная электронно-ионным взаимодействием у межфазной границы // Физика и техника полупроводников. — 1999. — № 8. — С. 933—939. [Gol'dman E. I., Zhdan A. G., Chucheva G. V. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 1999. N 8. P. 933]
8. Goldman E. I., Zhdan A. G., Chucheva G. V. Ion transport phenomena in oxide layer on the silicon surface and electron-ion exchange effects at the SiO<sub>2</sub>/Si interface // J. Appl. Phys. — 2001. — Vol. 89, N 1. — P. 204—218.
9. Komiya K., Omura Y. Spectroscopic characterization of stress-induced leakage current in sub 5-nm-thick silicon oxide film // J. Appl. Phys. — 2002. — Vol. 92, N 5. — С. 2593—2601.
10. Гольдман Е. И. Концентрация упругой неустойчивости распределения ионов и нейтральных частиц в изолирующем слое на поверхности полупроводника. // Физика и техника полупроводников. — 2006. — № 10. — С. 1209—1217. [Gol'dman E. I. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2006. N 10. P. 1209]

Д. т. н. Н. И. МУХУРОВ, к. т. н. Г. И. ЕФРЕМОВ,  
д. ф.-м. н. С. П. ЖВАВЫЙ

Республика Беларусь, г. Минск, Институт физики им. Б. И. Степанова  
НАН Беларуси  
E-mail: n.mukhurov@ifanbel.bas-net.by

Дата поступления в редакцию  
13.10 2010 г.

Оппонент к. т. н. Ю. Э. ПАЭРАНД  
(ДонНУ, г. Алчевск)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТОКОВЫХ МИКРОРЕЛЕ

*По результатам моделирования предложена конструкция электротокowego микрореле. Оценены характеристики микрореле при различных направлениях протекания электрического тока через меандровую систему планарной конструкции.*

Микроэлектромеханические реле широко используются в различных функциональных устройствах в качестве регулирующих, управляющих, контролируемых элементов. Важной частью микрореле являются микроактюаторы, создающие активные силы воздействия на чувствительные элементы. Большое внимание уделено теоретическому моделированию и практическим разработкам электростатических актюаторов [1—3]. Они выполняются в различных конструктивных вариантах, из которых можно выделить плоскопараллельные [4, 5], торсионные [4, 6], консольные [7—9], объемные, планарные. Их перспективность обуславливается малыми массогабаритными показателями и мизерным энергопотреблением. Однако, несмотря на ряд оригинальных предложений, управляемый участок перемещения подвижного элемента в межэлектродном промежутке составляет лишь одну треть его часть. Предлагаемые меры по его увеличению усложняют конструкцию и технологию и при этом требуют значительного повышения значения такого управляющего параметра как электрическое напряжение срабатывания [2, 5, 9]. Поэтому представляется целесообразным рассмотреть другие варианты изменения активных сил, обеспечивающих функционирование микрореле.

В настоящей работе приводятся результаты теоретического расчета и моделирования микрореле, в котором использован эффект взаимодействия электромагнитных сил, возникающих при протекании постоянного электрического тока через параллельные проводники. Показано, что этот эффект может быть реализован в предложенной конструкции электротокowego микрореле (ЭТМ) с электротокowym актюатором (ЭТА).

### Особенности конструкции электротокowego микрореле

По конструкции ЭТМ подобны электростатическим микрореле [10]. Пример плоскопараллельного

электротокowego микрореле, содержащего ЭТА, представлен на **рис. 1**. Оно состоит из диэлектрической подложки 1 и пластины 2, жестко соединенных между собой. В подложке выполнено прямоугольное углубление 5, на двух противоположных сторонах которого имеются ступеньки 3 с контактами 10. В середине пластины расположен жесткий подвижный якорь 4, который соединен с рамкой 11 пластины упругими держателями 9, расположенными «елочкой». На дне углубления и напротив, на внутренней стороне якоря, сформированы идентичные, зеркально расположенные неподвижный 6 и подвижный 7 токопроводящие силовые меандровые участки (МУ), образующие

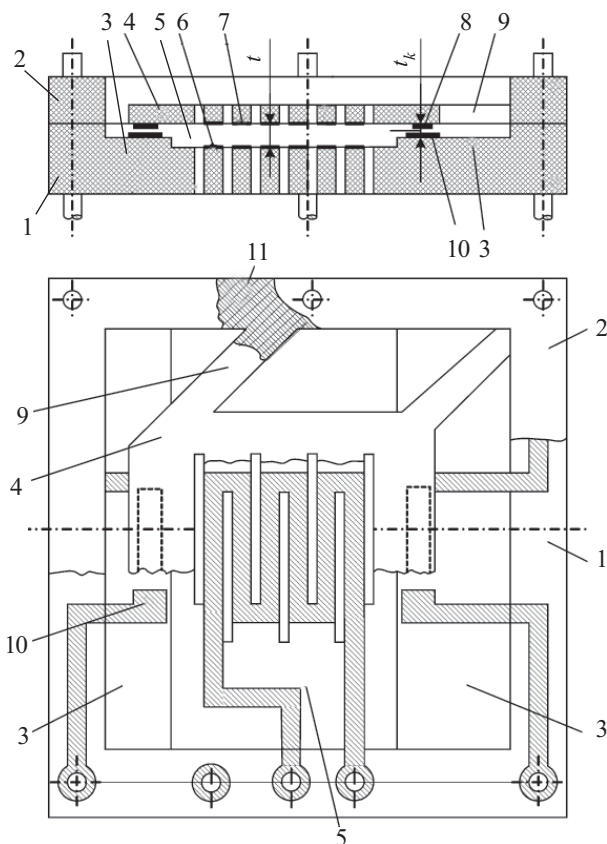


Рис. 1. Конструктивная схема электротокowego микрореле: 1 — подложка; 2 — диэлектрическая пластина; 3 — ступеньки в подложке; 4 — подвижный якорь; 5 — углубление в подложке; 6 — неподвижный МУ; 7 — подвижный МУ; 8 — перемычки; 9 — упругие держатели; 10 — контакты; 11 — рамка пластины



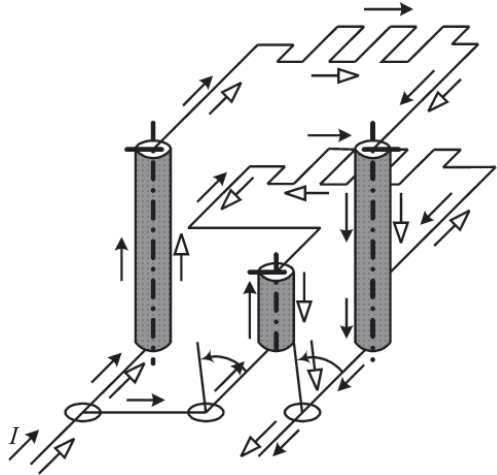


Рис. 2. Направление тока в меандровых участках при разном ходе электротеплового актюатора:  
 — прямой ход (параллельное включение МУ); — обратный ход (последовательное включение МУ)

ЭТА. Ветви МУ могут быть разделены сквозными пазами. Начала и концы МУ с помощью штырьков, соединяющих подложку с пластиной, включаются в управляющую цепь. Электрическая схема управляющей цепи предусматривает возможность как параллельного, так и последовательного включения МУ (рис. 2). На внутренней стороне якоря расположены также две переключки 8 напротив контактов 10. Эти пары входят в управляемую цепь как нормально разомкнутые (НР) контакты. Промежуток между МУ является рабочим межмеандровым расстоянием  $t$ , а между контактами и переключками — межконтактным расстоянием  $t_k$  ( $t_k < t$ ). Элементы электрических цепей соединены токопроводящими дорожками управляю-

щей и управляемой цепей. К основным параметрам ЭТМ относятся ток срабатывания, межмеандровое расстояние, управляемая часть рабочего цикла, усилие контакта и усилие возврата.

В качестве материала для изготовления частей ЭТМ может быть использован диэлектрик, обладающий высокими электрохимическими свойствами и позволяющий формировать элементы различной конфигурации. Наиболее предпочтительным материалом представляется анодный оксид алюминия (АОА) [3]. Его самоорганизующаяся ячеистая структура является основой формирования прецизионных конфигураций плоских и объемных перфорированных деталей. Такие детали можно изготавливать на оборудовании для производства микросхем, поскольку процесс их изготовления базируется на интегральной технологии и не требует разработки установок с уникальными параметрами. Толщина полученных пластин может быть от долей до сотен микрометров.

Токопроводящие элементы наносятся термическим напылением или распылением в вакууме металлов с близким к АОА значением КТР с одновременным или с последующим образованием топологического рисунка. Толщина напыления составляет доли микрометра (на рис. 1 соответствующие пленки показаны условно).

#### Теоретический расчет основных соотношений

При включении ЭТМ в управляющую цепь (рис. 2) по обоим МУ пойдет ток  $I$  в одном направлении, и якорь под действием электромагнитных активных сил  $F$  начнет приближаться к подложке (рис. 3, а). Согласно [11], величина сил  $F$  определяется формулой

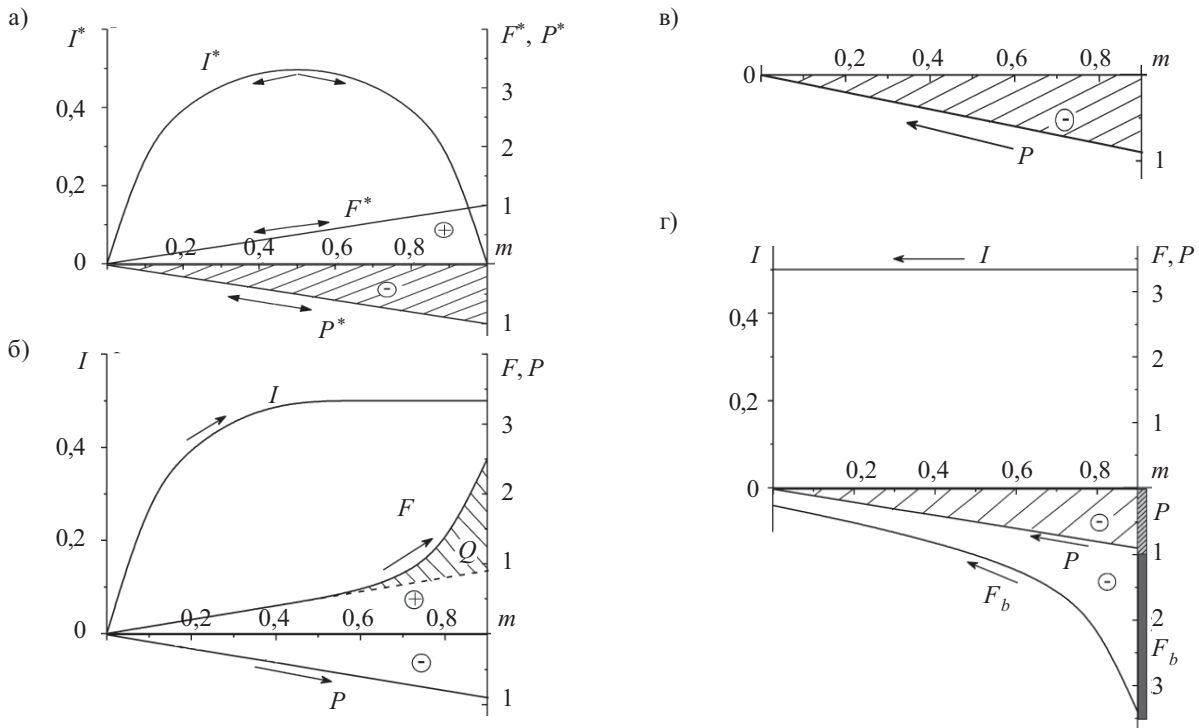


Рис. 3. Расчетные зависимости электрохимических параметров ЭТМ в рабочем цикле (а) и экспериментальные, полученные в процессе прямого (б) и обратного хода при отключении тока (в) и переключении тока (г)

$$F = \frac{\mu_0 I^2 L}{2\pi(t-y)}, \quad (1)$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная,  $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$  В·с/(А·м);  
 $L$  — суммарная длина ветвей меандра;  
 $y$  — смещение якоря.

В деформируемых держателях якоря возникнет реактивная механическая сила  $P$  [12], определяемая как

$$P = k \frac{Eab^3}{12l^3} qy = Ky, \quad (2)$$

где  $k$  — количество держателей;  
 $E$  — модуль упругости АОА;  
 $a, b, l$  — соответственно ширина, толщина, длина держателей;  
 $q$  — коэффициент заделки концов держателей;  
 $K$  — жесткость упругих держателей.

При постепенном плавном увеличении  $I$  в каждый момент сохраняется равновесное состояние, т. е.

$$F = P. \quad (3)$$

Из формул (1)—(3) следует, что для перемещения якоря на величину  $y$  необходим ток силой

$$I = \sqrt{\frac{2\pi K}{\mu_0 L}} y(t-y). \quad (4)$$

Согласно методике, изложенной в [3, 5], проведем разделение параметров в подкорневом выражении на постоянные и переменные в рабочем цикле реле и введем при этом величину относительного перемещения якоря в межмеандровом промежутке  $m = y/t = 0 \dots 1$ :

$$I = \sqrt{\frac{2\pi K t^2}{\mu_0 L}} \sqrt{m(1-m)}. \quad (5)$$

Обозначив

$$D = \sqrt{\frac{2\pi K t^2}{\mu_0 L}},$$

$$I^* = \sqrt{m(1-m)},$$

получим

$$I = I^* D.$$

Здесь  $D$  — конструктивная константа,  $I^*$  — базовая функция, характеризующая изменение  $I$  в зависимости от  $m$  и не зависящая от  $D$ . Ее дифференцирование показывает, что теоретически она представляет собой симметричную параболу с координатами экстремальной точки  $m_0 = 0,5$ ,  $I^*_{\max} = 0,5$  (рис. 3, а). Такая форма объясняется разной зависимостью  $F$  и  $P$  от  $y$ : активные электромагнитные силы  $F$  обратно пропорциональны  $y$ , а реактивные механические силы  $P$  прямо пропорциональны  $y$ . В интервале  $m = 0 \dots 0,5$  равновесное состояние достигается за счет интенсивного увеличения силы электрического тока в меандровых проводниковых элементах, а в области  $m = 0,5 \dots 0,9$  — за счет постепенного снижения  $I$ , обес-

печивающего равенство  $F$  и  $P$ . Однако практически реализовать такой цикл пока не представляется возможным, т. к. при снижении  $I$  и, следовательно,  $F$ , прогиб держателей уменьшается и начинается возврат якоря в исходное положение.

### Моделирование режима работы

В реальных условиях работы устройств, отслеживающих изменение электрического тока, величина  $I$  незначительно превышает величину  $I^*$ . После того как якорь пройдет положение, характеризующееся равновесным состоянием и значением относительной величины  $m_0$ , равновесие нарушается. В результате наблюдается резкое уменьшение межмеандрового расстояния под действием стремительно возрастающей силы  $F$ . Сближение якоря с неподвижным электродом оканчивается замыканием НР-контактов управляемой цепи и ее включением (рис. 3, б).

Оценим изменение величины контактного усилия  $Q$  в диапазоне изменения  $m$  от 0,5 до 0,9. Его возрастание с увеличением  $m$  определяется соотношениями

$$\alpha = \frac{F_m}{F_{m_0}} = \frac{1}{(1-m)^2};$$

$$\beta = \frac{P_m}{P_{m_0}};$$

$$\gamma = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{1}{4m(1-m)},$$

т. е. при  $m = 0,9$  (рис. 3, б) механические силы возрастают в 1,8 раза, электромагнитные — в 5 раз. Последние больше механических сил в 2,8 раза, что определяет максимальную величину  $Q$ .

Управляемый участок рабочего цикла, соответствующий равновесному состоянию якоря, ограничен диапазоном  $m = 0 \dots 0,5$ , что на 33,4% больше, чем в электростатических микрореле.

После замыкания управляемой цепи сразу или через некоторый интервал времени, определяемый заданным функциональным режимом, происходит отключение микрореле или переключение его на обратный ход. При отключении электромагнитные силы  $F$  равны 0. Возврат якоря в исходное положение осуществляется за счет реактивных сил  $P$ , которые значительно меньше  $F_{m=0,9}$  (рис. 3, в). Силы  $P$  должны не только превысить суммарную величину реактивных сил индуцированных зарядов на диэлектрических участках и инерцию подвижных масс, но и в случае залипания контактов преодолеть удерживающую их силу. Практически значения времени возврата имеют значительный разброс, что снижает надежность микрореле.

При переключении меандровых участков на последовательное соединение между проводниками создается электромагнитное поле с отталкивающей силой  $F_b$  обратного хода, равной  $F_m$ . Возврат якоря в первый момент будет происходить при суммарном воздействии реактивных механических сил  $P_{m=0,9}$  и превосходящих их почти в 3 раза электромагнитных сил  $F_b$  (рис. 3, г). Далее и те, и другие силы будут

уменьшаться, но их совместное действие повышает надежность возврата якоря в исходное положение и уменьшает время обратного хода. В переключающих схемах это позволяет увеличить силы  $F_b$  и повысить надежность срабатывания микрореле в диапазоне СВЧ. Реализация такого режима достигается кратковременным увеличением тока при переключении в  $n$  раз, что согласно формуле (1) повысит  $F$  в  $n^2$  раз при неизменной величине  $P$ .

### Выводы

Электротоковое микрореле предложенной конструкции работает от взаимодействия электромагнитных сил, возникающих между двумя идентичными меандровыми участками электрической цепи с одинаковым или противоположным направлением тока. По величине токи в меандровых участках могут быть равными и неравными.

Изменение направления действия электромагнитных сил в конце прямого хода подвижного якоря с притяжения на отталкивание при противоположном направлении протекания электрического тока через меандровые участки позволяет повысить скорость возврата якоря в исходное положение и надежность срабатывания.

Электротоковое микрореле может успешно работать в слаботочных электрических пороговых, регулирующих, высокочастотных устройствах.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Дятлов В. А., Коняшкин В. В., Потапов Б. Е., Фадеев С. И. Пленочная электромеханика.— Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1991. [Diatlov V. A. Novosibirsk. Nauka. 1991]
2. Chan E. K., Dutton R. W. Effects of capacitors, resistors and residual charge on the static and dynamic performance of electro-

statically — actuated devices // Proc. of SPIE.— 1999.— Vol. 3680.— P. 120—130.

3. Мухуров Н. И., Ефремов Г. И., Куданович О. Н. Устройства микромеханики и микросенсорики на нанопористом анодном оксиде алюминия.— Минск: Бестпринт, 2005. [Mukhurov N. I., Efremov G. I., Kudanovich O. N. Minsk. Bestprint. 2005]

4. Petersen K.E. Silicon as a Mechanical Material // IEEE.— 1982.— Vol. 70, N 5.— P. 420—457.

5. Ефремов Г. И., Мухуров Н. И. Функциональные возможности электростатических микрореле по результатам моделирования // Тр. науч.-техн. конф. «Кибернетика и технологии XXI века».— Россия, г. Воронеж.— 2001.— С. 499—508. [Efremov G. I., Mukhurov N. I. // Tr. nauch.tekhn. konf. «Kibernetika i tekhnologii KhKhI veka». Russia, Voronezh. 2001. P. 499]

6. Hah D., Yoon T., Hong S. A low-voltage actuated micromachined microwave switch using torsion springs and leverage // IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques.— 2000.— Vol. 48, N 12.— P. 2540—2543.

7. Pat. 4959515 USA. Micromechanical electric shunt and encoding devices made therefrom / P. M. Zavracky, R. H. Morrison Jr.— 25.09 1990.

8. Efremov G. I., Mukhurov N. I., Galdetskiy A. V. Analysis of electromechanical parameters of electrostatic microrelay with a movable elastic cantilever electrode // Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS.— Paris.— 2000.— Vol. 4019.— P. 580—585.

9. Алексенко А. Г., Балан Н. Н. Анализ эффекта схлопывания электродов электростатических актюаторов в MEMS- и NEMS-устройствах // Нано- и микросистемная техника.— 2005.— № 7.— С. 31—41. [Aleksenko A. G., Balan N. N. // Nano i mikrosistemnaya tekhnika. 2005. N 7. P. 31]

10. Пат. 2667 РБ. Электростатическое микрореле / И. Л. Григоршин, Г. И. Ефремов, Н. И. Мухуров.— 1996. [Pat. 2667 RB. / I. L. Grigorishin, G. I. Efremov, N. I. Mukhurov. 1996]

11. Кухлинг Х. Справочник по физике.— М.: Мир, 1983. [Kukhling Kh. Moscow. Mir. 1983]

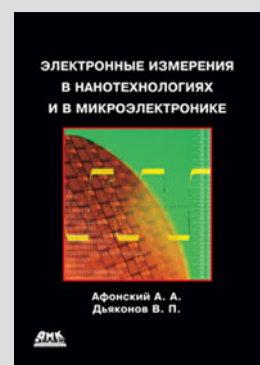
12. Справочник машиностроителя. Т. 3 / Под ред. С. В. Серенсена.— М.: Машгиз, 1955. [Pod red. S. V. Serensena. Moscow. Mashgiz, 1955]

### НОВЫЕ КНИГИ

#### НОВЫЕ КНИГИ

**Афонский А. А., Дьяконов В. П. Электронные измерения в нанотехнологиях и микроэлектронике.— М.: ДМК Пресс, 2011 г.— 688 с.**

Первая в России книга по самым современным электронным электро- и радиоизмерениям и измерительным приборам, применяемым в научных исследованиях, тестировании и испытании устройств и систем микроэлектроники и нанотехнологий. Впервые подробно описаны средства измерений, применяемые в условиях крупносерийного микроэлектронного производства, и приборы ведущих в их разработке и производстве фирм: Keithley, Tektronix, Agilent Technologies, LeCroy, R&S и др. Особое внимание уделено анализу и генерации тестовых сигналов, измерению их параметров в области малых и сверхмалых значений времени, измерению сверхмалых токов и напряжений, анализу импеданса и иммитанса цепей, измерениям статических и динамических характеристик полупроводниковых приборов и интегральных микросхем и др. Самый крупный обзор современных зарубежных и отечественных измерительных приборов на рынке России и мира. Для инженеров, научных работников, аспирантов, преподавателей и студентов вузов и университетов технического и классического типов.





И. И. КРИВАЛЬ, А. И. СКРИПНЮК,  
В. А. ПРОЦЕНКО, А. В. МАРЬЕНКО

Украина, г. Киев, ОАО «Меридиан» им. С. П. Королева,  
E-mail: Feedback@meridian.kiev.ua

Дата поступления в редакцию  
10.12.2010 г.

Оппонент к. т. н. Э. Н. ГЛУШЕЧЕНКО  
(НПП «Сатурн», г. Киев)

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НЕКОТОРЫХ УЗЛОВ ЧАСТОТОМЕРОВ СВЧ-ДИАПАЗОНА

*Приведены рекомендации по выбору оптимальных параметров таких узлов частотомеров СВЧ-диапазона, как преобразователь частоты, синтезатор частоты, усилитель промежуточной частоты, позволяющих увеличить чувствительность приборов и точность измерений.*

В [1] авторами был рассмотрен общий принцип построения и работы СВЧ-частотомеров УА ЧЗ-79М и УА ЧЗ-101, однако не были уточнены требования, предъявляемые к узлам частотомера. Для специалистов, работающих в области проектирования частотомеров СВЧ, очень важны и полезны сведения, которые касаются оптимальных параметров таких узлов частотомера, как преобразователь частоты, синтезатор частоты, усилитель промежуточной частоты (УПЧ). От выбора этих параметров зависит решение основной задачи, которая стоит перед разработчиками СВЧ-частотомеров — обеспечение высокоточных измерений частоты в автоматическом режиме при работе как с синусоидальными, так и с радиоимпульсными сигналами. Кроме того, от них напрямую зависит диапазон измеряемых частот, точность измерений, алгоритм работы частотомера и, наконец, его габариты, масса и надежность.

Работа частотомеров в СВЧ-диапазоне происходит с обязательным преобразованием частот входного сигнала в диапазон более низких промежуточных частот [2]. На этих частотах происходит дальнейшая обработка сигнала и его измерение.

В последнее время в Украине и за рубежом в качестве преобразователей частоты используют не только гармонические сместители, но и стробоскопические преобразователи частоты (семплеры), работающие в диапазоне частот до 170 ГГц [3].

Эти устройства производят преобразование частот входного сигнала за счет стробирования его на гармониках сигнала от перестраиваемого синтезатора частоты.

Основными узлами СВЧ-частотомеров являются стробоскопический преобразователь частоты, перестраиваемый синтезатор частоты, УПЧ, микроконтроллер и др., описанные в [1].

Результатом стробоскопического преобразования является промежуточная частота  $f_{пч}$ , которая связана с измеряемым сигналом  $f_{изм}$  выражением

$$f_{изм} = Nf_c \pm f_{пч} \quad (1)$$

где  $N$  — номер гармоники частоты синтезатора  $f_c$ , на которой осуществляется преобразование. Знак « $\pm$ » означает, что преобразование СВЧ-сигнала происходит как на прямом, так и на «зеркальном» каналах. На зеркальном канале при увеличении частоты синтезатора от первоначального значения промежуточная частота увеличивается, а на прямом — уменьшается.

Если преобразование осуществляется на зеркальном канале, то измеряемые частоты будут определяться следующим образом:

$$\begin{aligned} f_{изм \min(3)N} &= Nf_{c \min} - f_{пч \max}; \\ f_{изм \max(3)N} &= Nf_{c \max} - f_{пч \min}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $f_{изм \min(3)N}$ ,  $f_{изм \max(3)N}$  — границы диапазона измеряемых частот на  $N$ -й гармонике при работе на зеркальном канале;  $f_{пч \max}$ ,  $f_{пч \min}$  — максимальная и минимальная частоты, полученные в процессе преобразования и прошедшие через полосу УПЧ;  $f_{c \min}$ ,  $f_{c \max}$  — минимальная и максимальная частоты синтезатора, в границах которых происходит перестройка его частоты.

Если преобразование происходит на прямом канале, то измеряемые частоты будут определяться как

$$\begin{aligned} f_{изм \min(\Pi)N} &= Nf_{c \min} + f_{пч \min}; \\ f_{изм \max(\Pi)N} &= Nf_{c \max} + f_{пч \max}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $f_{изм \min(\Pi)N}$ ,  $f_{изм \max(\Pi)N}$  — границы диапазона измеряемых частот на  $N$ -й гармонике при работе на прямом канале.

Частоты синтезатора и полоса УПЧ выбраны правильно в том случае, если выполняется условие

$$f_{изм \max(3)N} \geq f_{изм \min(\Pi)N} \quad (4)$$

Кроме того, должно осуществляться перекрытие измеряемых частот при работе на 1-й, 2-й, а также последующих гармониках, т. е. должны отсутствовать так называемые мертвые зоны, где измерение невозможно, а значит, должно выполняться условие

$$f_{изм \max(\Pi)N} \geq f_{изм \min(3)N+1} \quad (5)$$

Номер гармоники  $N$  определяется по следующему алгоритму.

По команде микроконтроллера происходит пошаговая перестройка частоты синтезатора с максимального значения до минимального, т. е. с  $f_{c \max}$  до  $f_{c \min}$ , до появления на выходе УПЧ сигнала промежуточной частоты  $f_{пч1}$ . После этого перестройка синтезатора останавливается и измеряется его частота  $f_{c1}$  и промежуточная частота  $f_{пч1}$ . Затем частота синтезатора смещается на величину  $\Delta f_c$ , и снова производится вычисление и запоминание частоты синтезатора  $f_{c2} = f_{c1} + \Delta f_c$  и соответствующее ей значение промежуточной частоты  $f_{пч2}$ .

Номер гармоники  $N$  определяют как

$$N = |f_{пч2} - f_{пч1}| / |f_{c2} - f_{c1}|. \quad (6)$$

#### Требования, предъявляемые к стробоскопическому преобразователю частоты

Стробоскопический преобразователь частоты (далее — преобразователь) должен выполнять свою главную задачу — преобразовывать частоту входного измеряемого сигнала. Это преобразование осуществляется на гармониках частот синтезатора. Основными параметрами преобразователя является диапазон преобразуемых частот и коэффициент преобразования, который должен обеспечивать на его выходе достаточный уровень преобразованного сигнала.

В частотомерах УА ЧЗ-79М и УА ЧЗ-101 используются преобразователи собственного изготовления. Так, в диапазоне измеряемых частот от 200 МГц до 18 ГГц используется преобразователь в микрополосковом исполнении с коаксиальным входом. Он обеспечивает коэффициент преобразования  $-45 \dots -50$  дБ в полосе преобразованных частот от 40 до 130 МГц, на частотах синтезатора в диапазоне от 329 до 470 МГц.

В диапазоне измеряемых частот от 18 до 40 ГГц используются преобразователи с волноводным входом. Они обеспечивают коэффициент преобразования  $-50$  дБ в полосе частот от 40 до 130 МГц. Синтезатор частоты при этом перестраивается в диапазоне от 458 до 470 МГц с шагом 200 кГц.

#### Выбор оптимальных параметров синтезатора частоты

Выбор диапазона перестройки частоты синтезатора обусловлен, в первую очередь, номерами гармоник, на которых будет происходить преобразование входного измеряемого сигнала, а они, в свою очередь, зависят от его частоты — чем выше измеряемая частота, тем более высокими будут гармоники.

Известно, что с ростом номера гармоники уровень преобразованного сигнала падает по экспоненциальному закону. С другой стороны, более высокочастотный синтезатор труднее реализовать практически. Поэтому идут на компромиссное решение. Это можно показать на примере.

Допустим, необходимо измерить частоту 40 ГГц.

Если максимальная частота синтезатора, например, 1000 МГц, то максимальный номер гармоники, на которой происходит преобразование частоты, будет

$$N_{\max} = \frac{40 \cdot 10^9 \text{ Гц}}{1 \cdot 10^9 \text{ Гц}} = 40.$$

Технически реализовать такой синтезатор довольно сложно, поэтому необходимо понижать его частоту с компромиссным выбором оптимального номера гармоники.

Так, в частотомерах УА ЧЗ-79М и УА ЧЗ-101 верхняя частота синтезатора равна 470 МГц. Тогда на частоте 40 ГГц максимальный номер гармоники будет

$$N_{\max} = \frac{40 \cdot 10^9 \text{ Гц}}{470 \cdot 10^6 \text{ Гц}} \approx 86.$$

Стробоскопический преобразователь частоты, который используется в частотомере, на гармониках с номерами не выше 86 обеспечивает достаточный для работы уровень преобразованного сигнала.

Минимальная частота синтезатора  $f_{c \min}$ , соответствующая условиям измерения минимальной частоты сигнала  $f_{изм \min}$ , вычисляется из выражения

$$f_{изм \min} = N f_{c \min} - f_{пч \max},$$

где  $f_{изм \min}$  — минимально возможная измеряемая частота сигнала;  $f_{пч \max}$  — максимальная промежуточная частота полосы пропускания УПЧ.

Тогда

$$f_{c \min} = (f_{изм \min} + f_{пч \max}) / N. \quad (7)$$

Так как минимальная частота измеряется на первой гармонике, т. е.  $N=1$ , получим

$$f_{c \min} = f_{изм \min} + f_{пч \max}. \quad (8)$$

В частотомерах УА ЧЗ-79М и УА ЧЗ-101 минимальная частота измерения составляет 199 МГц,  $f_{пч \max} = 130$  МГц, а значит  $f_{c \min} = 329$  МГц.

Особое внимание необходимо уделить выбору величины приращения частоты синтезатора  $\Delta f_c$  при определении номера гармоники  $N$  по формуле (6). Ее следует выбирать из соображений компромисса между однозначным определением номера гармоники  $N$  при измерении частоты с большой девиацией и измерением несущей частоты коротких радиоимпульсных сигналов наносекундной длительности. Если  $\Delta f_c$  будет меньше девиации измеряемой частоты, то результат измерения может быть ложным из-за неоднозначного определения номера гармоники  $N$ .

При измерении несущей частоты радиоимпульсных сигналов наносекундной длительности абсолютная погрешность измерения составляет 300—400 кГц, частоты  $f_{пч1}$ ,  $f_{пч2}$  в формуле (6) будут измерены с этой погрешностью, что приведет к неоднозначности в определении номера гармоники  $N$ . Поэтому величина  $\Delta f_c$  должна быть как можно больше.

С другой стороны, выбор величины  $\Delta f_c$  ограничен полосой пропускания УПЧ. Поэтому из соображений оптимизации конструкции в частотомере УА ЧЗ-79М величина  $\Delta f_c$  выбрана равной 1 МГц, в частотомере УА ЧЗ-101 в диапазоне частоты от 18 до 25 ГГц  $\Delta f_c = 800$  кГц, а в диапазоне от 25 до 40 ГГц  $\Delta f_c = 400$  кГц.

Величина разрешения по частоте (дискретный шаг перестройки частоты синтезатора) выбирается из условия достаточной фильтрации частоты дискрета, оптимальной полосы УПЧ и выбранного максимального номера гармоники.

В частотомерах UA ЧЗ-79М и UA ЧЗ-101 шаг перестройки частоты синтезатора выбран равным 200 кГц. Эта частота на фоне высоких частот синтезатора легко отфильтровывается, и обеспечивается уровень побочных составляющих в сигнале синтезатора порядка 65—70 дБ.

### Выбор оптимальной полосы УПЧ

Полоса частот УПЧ выбирается с учетом нескольких условий.

Верхняя частота полосы пропускания  $f_{\text{чп max}}$  не должна быть больше максимально возможной частоты преобразования. При стробоскопическом преобразовании максимальная преобразованная промежуточная частота определяется как

$$f_{\text{пч max}} \leq \frac{f_{\text{с max}}}{2}. \quad (9)$$

В частотомерах UA ЧЗ-79М и UA ЧЗ-101 верхняя частота синтезатора  $f_{\text{с max}}$  выбрана равной 470 МГц. Тогда

$$f_{\text{пч max}} = \frac{470 \text{ МГц}}{2} = 235 \text{ МГц}.$$

Как правило, на близких к максимальным промежуточным частотам не работают, т. к. с ростом  $f_{\text{пч}}$  коэффициент преобразования и отношение сигнал/шум падают. Поэтому из диапазона преобразованных промежуточных частот «вырезают» определенную полосу — от  $f_{\text{пч min}}$  до  $f_{\text{пч max}}$ .

Допустим, при измерении входной частоты 18 ГГц в момент определения номера гармоники  $N$  по формуле (6) первая промежуточная частота  $f_{\text{пч1}}$  находится в центре полосы пропускания. Если преобразование частоты произойдет в районе 470 МГц, то

$$N_{\text{max}} = \frac{18 \cdot 10^9 \text{ ГГц}}{470 \cdot 10^6 \text{ ГГц}} \approx 39.$$

Если значение  $N_{\text{max}}$  взять с запасом, например,  $N'_{\text{max}} = 45$ , то при смещении частоты синтезатора на  $\pm 1$  МГц при определении номера гармоники  $N$  значение второй промежуточной частоты будет равно

$$f_{\text{пч2}} = N'_{\text{max}} \Delta f_{\text{с}} = 45 \cdot 1 \text{ МГц} = 45 \text{ МГц}.$$

При этом ширина полосы пропускания УПЧ должна составлять  $\Pi = 45 \text{ МГц} \cdot 2 = 90 \text{ МГц}$ .

С другой стороны, при измерении несущей частоты радиоимпульсных сигналов наносекундной длительности, допустим  $\tau_{\text{и}} \geq 300 \text{ нс}$ , необходимо, чтобы в радиоимпульсе длительностью 300 нс поместилось не менее десяти периодов промежуточной преобразованной частоты. В противном случае несущая частота будет измерена с большой погрешностью (до 400 кГц по абсолютной величине) и увеличится время измерения.

Если  $f_{\text{пч min}} = 40 \text{ МГц}$ , то период преобразованной несущей частоты составит

$$T_{\text{пч min}} = \frac{1}{40 \cdot 10^6 \text{ ГГц}} = 25 \text{ нс}.$$

При этом минимальное количество преобразованных периодов будет равно

$$n = \frac{300 \text{ нс}}{25 \text{ нс}} = 12.$$

Это означает, что в преобразованном радиоимпульсе длительностью 300 нс будет помещаться 12 периодов преобразованной промежуточной частоты 40 МГц, что вполне приемлемо.

И, наконец, известно, что чем шире полоса пропускания, тем меньшим на выходе УПЧ будет отношение сигнал/шум, которое в итоге может стать ниже допустимого порога.

Исходя из всех перечисленных ограничений в частотомерах UA ЧЗ-79М и UA ЧЗ-101 полоса УПЧ выбрана оптимальной — от 40 до 130 МГц.

Таким образом, при измерении входной частоты в диапазоне от 0,2 до 18 ГГц при диапазоне перестройки частоты синтезатора от 329 до 470 МГц и смещении частоты синтезатора  $\Delta f_{\text{с}} = 1 \text{ МГц}$  при определении номера гармоники максимальное изменение промежуточной частоты будет составлять не более  $\pm 45 \text{ МГц}$ . Поэтому промежуточная частота  $f_{\text{пч2}}$  в формуле (6) не будет при этом выходить за пределы полосы пропускания.

Для диапазона частот выше 18 ГГц в частотомере UA ЧЗ-101 во избежание выхода промежуточной частоты за пределы полосы пропускания уменьшена величина смещения частоты синтезатора  $\Delta f_{\text{с}}$ . Так, в диапазоне частот от 18 до 25 ГГц  $\Delta f_{\text{с}} = 800 \text{ кГц}$  и максимальный номер гармоники здесь не превышает 54. В диапазоне частот от 25 до 40 ГГц  $\Delta f_{\text{с}} = 400 \text{ кГц}$  при максимальном номере гармоники 86.

В первом случае изменение промежуточной частоты будет равно

$$f_{\text{пч2}} = 0,8 \text{ МГц} \cdot 54 = 44 \text{ МГц},$$

а во втором

$$f_{\text{пч2}} = 0,4 \text{ МГц} \cdot 86 = 34,4 \text{ МГц},$$

что меньше 45 МГц в обоих случаях.

Наконец, когда основные параметры узлов выбраны, целесообразно проверить выполнение требований, изложенных в формулах (2) и (3).

При работе на первой гармонике ( $N=1$ ):

$$f_{\text{изм min}(3)} = 199 \text{ МГц};$$

$$f_{\text{изм max}(3)} = 430 \text{ МГц};$$

$$f_{\text{изм min}(\Pi)} = 369 \text{ МГц};$$

$$f_{\text{изм max}(\Pi)} = 600 \text{ МГц}.$$

При работе на второй гармонике ( $N=2$ ):

$$f_{\text{изм min}(3)} = 528 \text{ МГц};$$

$$f_{\text{изм max}(3)} = 900 \text{ МГц};$$

$$f_{\text{изм min}(\Pi)} = 698 \text{ МГц};$$

$$f_{\text{изм max}(\Pi)} = 1070 \text{ МГц}.$$



Проведенная проверка показывает, что при работе на первой гармонике прямого и зеркального каналов возможно измерение входной частоты в диапазоне от 199 до 600 МГц без «мертвых зон», при этом выполняется условие (4), т. е. 430 МГц > 369 МГц. При работе на второй гармонике возможно измерение частоты в диапазоне от 528 до 1070 МГц. При этом выполняется условие (5), т. е. 600 МГц > 528 МГц.

В целом, диапазон измерения входных частот на первой и второй гармониках будет находиться в пределах от 200 до 1070 МГц. На следующих гармониках проверку производить не обязательно, если перекрытие по частоте осуществляется на 1-й и 2-й гармониках.

### Алгоритм измерения

Рассмотрим алгоритм измерения частоты в диапазоне от 0,2 до 18 ГГц.

При введении прибора в режим измерения осуществляется перестройка частоты синтезатора  $f_c$  сверху вниз, т. е. с частоты 470 до 329 МГц. После нахождения первой промежуточной частоты  $f_{пч1}$  происходит остановка синтезатора и измеряются  $f_{пч1}$  и  $f_{c1}$ .

По команде микроконтроллера частота синтезатора смещается на  $\Delta f_c = \pm 1$  МГц, после чего находят значение второй промежуточной частоты  $f_{пч2}$  и частоты синтезатора  $f_{c2} = f_{c1} \pm 1$  МГц.

По формуле (6) определяется номер гармоники  $N1$ . Затем частота синтезатора возвращается обратно, и снова вычисляется номер гармоники  $N2$ . Процедура повторяется пятикратно, измеренные значения гармоник округляются и сравниваются. При достижении их равенства номер гармоники заносится в память микроконтроллера, в котором по формуле (1) вычисляется искомая частота  $f_{изм}$ . Результат измерения высвечивается на индикаторе.

В диапазоне частот от 18 до 25 ГГц и от 25 до 40 ГГц измерения происходят аналогично, но с разным смещением частоты: в первом диапазоне  $\Delta f_c = 0,8$  МГц, а во втором —  $\Delta f_c = 0,4$  МГц.

Процесс измерения несущей частоты радиоимпульсных сигналов аналогичен вышеописанному.

\*\*\*

Таким образом, выбор оптимальных параметров таких узлов СВЧ-частотомеров, как стробоскопический преобразователь частоты, синтезатор частоты и УПЧ, позволил создать высокочувствительные частотомеры, которые работают в очень широком диапазоне — от 200 МГц до 40 ГГц и отличаются надежностью измерений.

Удалось также автоматизировать процесс измерения частоты и аппаратно совместить процессы измерения как несущей частоты радиоимпульсных сигналов, так и частоты синусоидальных сигналов.

Используя приведенные рекомендации по выбору оптимальных параметров узлов частотомера, специалисты ОАО «Меридиан» им. С. П. Королева начали модернизацию частотомера УА ЧЗ-101. В модернизированном частотомере вместо волноводных стробоскопических преобразователей частоты будет использован широкополосный стробоскопический сместитель в коаксиальном исполнении. Это позволит удешевить прибор, сделать его более удобным в эксплуатации и расширить сферы его применения.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ.

1. Криваль И. И., Скрипнюк А. И., Проценко В. А., Марьенко А. В. Малогабаритные цифровые частотомеры сверхвысокочастотного диапазона // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 5. — С. 54—57. [Krival' I. I., Skripnyuk A. I., Protsenko V. A., Mar'enko A. V. // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature. 2009. N 5. P. 54]
2. Аппаратура для частотных и временных измерений / Под ред. А. П. Горшкова. — М.: Сов. радио, 1971. [Pod red. A. P. Gorshkova. Moscow. Sov. radio, 1971]
3. Коаксиальные, волноводные и оптические устройства. Каталог. — Нижний Новгород: Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный институт «Кварц», 2010. [Katalog. Nizhnii Novgorod: Nizhegorodskii nauchnoissledovatel'skii priborostroitel'nii institut «Kvarts», 2010]



## 14-я специализированная выставка

25—27 октября 2011 года

ПВЦ "Радмир Экспохолл"

(Украина, г. Харьков, ул. Академика Павлова, 271)

### Тематика выставки

- Контрольно-измерительные приборы для электрических цепей и сетей.
- Электрическое, электромеханическое, электрофизическое, электрохимическое измерительное оборудование для измерения не электрических параметров.
- Электрические и электронные контрольно-измерительные приборы для лабораторных и ядерных исследований.
- Электронное контрольно-измерительное вибрационное и акустическое оборудование.
- Магнитная и электромагнитная измерительная аппаратура.
- Линейно-угловые измерения, приборы для измерения перемещений, геодезическая, топографическая измерительная аппаратура.
- Оптические измерительные приборы.
- Приборы для измерения и контроля давления.
- Счетчики электроэнергии, воды, газа, тепла.
- Оборудование для измерения и контроля объема, уровня и расхода жидкостных и газовых сред.
- Приборы и датчики для измерения веса.
- Приборы для контроля технологических процессов.
- Приборы для измерения времени и частоты.
- Приборы для температурных измерений.

К. ф.-м. н. А. С. ГАРКАВЕНКО

Германия, г. Штутгарт, МНПЦ энергосберегающих технологий  
E-mail: garks@arcor.de

Дата поступления в редакцию  
23.03 2011 г.

Оппонент д. т. н. В. А. МОКРИЦКИЙ  
(ОНПУ, г. Одесса)

## СКОРОСТНЫЕ УРАВНЕНИЯ ЭКСИТОННОГО ЛАЗЕРА

*Получены скоростные уравнения экситонного лазера в системе взаимодействующих экситонов и выведены условия инверсной населенности и генерации. Указана принципиально новая возможность создания гамма-лазера.*

Лазерная генерация в системе свободных экситонов экспериментально наблюдалась достаточно давно [1—3]. Тогда же был рассчитан спектр усиления для экситонов в кристалле CdS [4], однако условие образования инверсной населенности не получено до сих пор. Более того, теория показывает, что связывание электронов и дырок в экситоны делает невозможным создание инверсной населенности между собственными энергетическими зонами полупроводника. Это справедливо, если экситоны рассматриваются как газ невзаимодействующих бозе-частиц, находящихся в равновесии с электронами и дырками. Поэтому не верно выражение для инверсной населенности, полученное в [5].

Опыты показывают, что в некоторых полупроводниковых кристаллах при концентрации экситонов  $10^{16}$ — $10^{17}$  см<sup>-3</sup> значительную роль в испускании и поглощении света начинают играть неупругие экситон-экситонные столкновения и безызлучательная Оже-рекомбинация. В результате столкновения энергия и импульс одного экситона передаются другому. Первый экситон рекомбинирует с испусканием фотона, а второй либо ионизируется, либо переходит на более высокий экситонный энергетический уровень. Схема излучательных и безызлучательных переходов представлена на рисунке, где видно, что лазер работает по трехуровневой схеме.

Целью настоящей работы является получение скоростных уравнений экситонного лазера для такой системы и условий инверсной населенности и генерации.

При составлении скоростных уравнений диффузией экситонов можно пренебречь. Тогда согласно рисунку их можно представить как

$$\frac{d\Delta n}{dt} = g - (\sigma_{ex} + A_1 + A_2) \times \Delta n^2 + \alpha \Delta n_{ex}^1; \quad (1)$$

$$\frac{d\Delta n_{ex}^1}{dt} = R_{ex}^B - (W_{cn} + B) \Delta n_{ex}^1 + \nu \Delta n_{ex}^1 - \alpha \Delta n_{ex}^1 + \sigma_{ex} \Delta n^2 - (\Delta n_{ex}^1 - \Delta n_{ex}^0) W_B \Delta n_{\phi}; \quad (2)$$

$$\frac{d\Delta n_{ex}^0}{dt} = (W_{cn} + B) \Delta n_{ex}^1 - R_{ex}^B + (\Delta n_{ex}^1 - \Delta n_{ex}^0) W_B \Delta n_{\phi}; \quad (3)$$

$$\frac{d\Delta n_{\phi}}{dt} = (\Delta n_{ex}^1 - \Delta n_{ex}^0) W_B \Delta n_{\phi} + W_{cn} \Delta n_{ex}^1 - 2\kappa \Delta n_{\phi}; \quad (4)$$

$$\Delta n_{ex}^1 + \Delta n_{ex}^0 = \Delta n_{ex}, \quad (5)$$

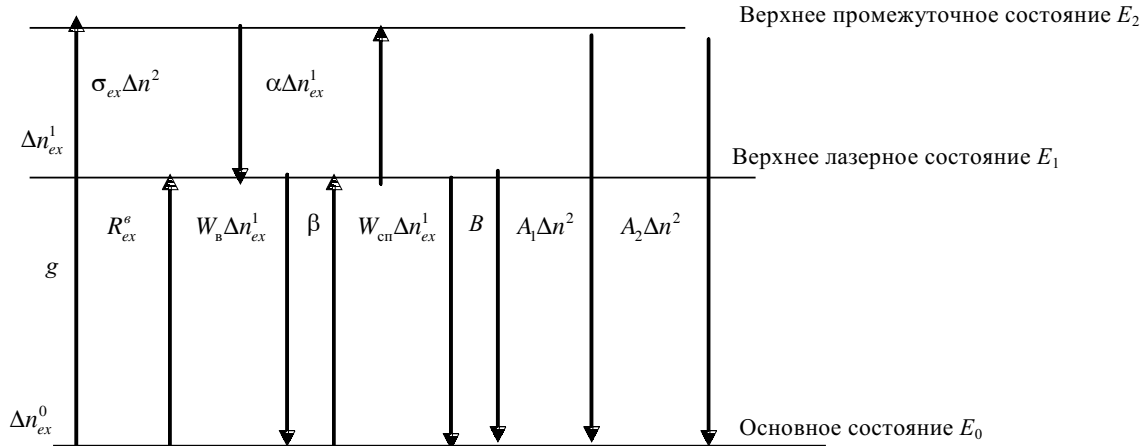
где  $\Delta n$  — концентрация возбужденных электронов;  
 $g$  — скорость генерации электронно-дырочных пар при возбуждении полупроводника квантами света или электронным пучком;  
 $\sigma_{ex}$  — вероятность (коэффициент) связывания свободных электронов и дырок в экситоны;  
 $A_1, A_2$  — вероятности излучательной и безызлучательной спонтанной рекомбинации электронов и дырок, соответственно;  
 $\alpha, \beta$  — вероятность диссоциации и возбуждения экситонов за счет неупругого экситон-экситонного рассеяния, соответственно;  
 $\Delta n_{ex}^1$  — число экситонов в возбужденном состоянии  $E_1$ ;  
 $R_{ex}^B$  — скорость возбуждения экситонов,  $R_{ex}^B = w_{12} \Delta n_{ex}^0$ ;  
 $w_{12}$  — вероятность вынужденного перехода из основного уровня  $E_0$  на возбужденный уровень  $E_1$ ;  
 $\Delta n_{ex}^0$  — число экситонов в основном состоянии  $E_0$ ;  
 $W_{cn}, B$  — вероятность излучательной и безызлучательной спонтанной рекомбинации экситонов, соответственно;  
 $W_B$  — вероятность вынужденной (стимулированной) излучательной рекомбинации экситонов;  
 $\Delta n_{\phi}$  — число излучаемых фотонов;  
 $t_0$  — время жизни фотона в резонаторе лазера.

Обозначим величину, обратную  $t_0$ , через  $2\kappa$ . Коэффициент потерь в резонаторе отражается величиной  $2\kappa \Delta n_{\phi}$ .

Поскольку при температуре жидкого азота в экситоны связываются практически все электронно-дырочные пары [6], вероятности  $A_1$  и  $A_2$  будут пренебрежимо малы по сравнению с  $\sigma_{ex}$ , т. е.  $\sigma_{ex} \gg A_1$  и  $\sigma_{ex} \gg A_2$ . Тогда уравнения (1)—(5) преобразуются к виду

$$\frac{d\Delta n}{dt} = g - \sigma_{ex} \Delta n^2 + \alpha \Delta n_{ex}^1; \quad (1')$$

$$\frac{d\Delta n_{ex}^1}{dt} = R_{ex}^B - B \Delta n_{ex}^1 + (\beta - \alpha) \Delta n_{ex}^1 + \sigma_{ex} \Delta n^2 - (\Delta n_{ex}^1 - \Delta n_{ex}^0) W_B \Delta n_{\phi}; \quad (2')$$



Трехуровневая схема рабочих состояний

$$\frac{d\Delta n_{ex}^0}{dt} = B\Delta n_{ex}^1 - R_{ex}^B + (\Delta n_{ex}^1 - \Delta n_{ex}^0)W_B\Delta n_{\phi}; \quad (3')$$

$$\frac{d\Delta n_{\phi}}{dt} = (\Delta n_{ex}^1 - \Delta n_{ex}^0)W_B\Delta n_{\phi} - 2\kappa\Delta n_{\phi}; \quad (4')$$

$$\Delta n_{ex}^1 + \Delta n_{ex}^0 = \Delta n_{ex}. \quad (5')$$

#### Модель процесса генерации излучения

В процессе излучательной рекомбинации экситонов инверсия населенности возникает автоматически, т. к. они являются бозонами. Отсутствие запрета Паули для них делает возможным накопление неограниченного числа таких квазичастиц на верхнем возбужденном энергетическом уровне [6], что отражается неравенством

$$\Delta n_{ex}^1 \gg \Delta n_{ex}^0. \quad (6)$$

Среднее число невозбужденных экситонов на основном уровне  $E_0$  равно

$$\Delta n_{ex}^0 = \{\exp(E_0/(kT)) - 1\}^{-1},$$

а среднее число возбужденных экситонов на уровне  $E_1$  равно [7, с. 510]

$$\Delta n_{ex}^1 = \{\exp[(E_1 - E_0 - \mu)/(kT)] - 1\}^{-1},$$

где  $k$  — постоянная Больцмана;  $\mu$  — химический потенциал экситонов.

Используя неравенство (6), получим условие инверсной населенности:

$$E_1 \gg 2E_0 + \mu. \quad (7)$$

Время жизни экситонов  $\tau$  на верхнем возбужденном уровне до излучательной рекомбинации составляет  $10^{-9}$ — $10^{-10}$  с. Это означает, что при плотности числа экситонов около  $10^{17}$  см $^{-3}$  скорость возбуждения  $g$  такой системы должна составлять  $10^{26}$ — $10^{27}$  см $^{-3}$ ·с $^{-1}$ . Например, при электронной накачке полупроводников с энергией возбуждения  $E^0=50$  кэВ, с плотностью тока накачки  $j$  и глубиной проникновения электронов в кристалл  $d \approx 5$  мкм она составляет

$$g = 2 \cdot 10^{26} j / E_g, \quad (8)$$

где  $E_g$  — ширина запрещенной зоны.

Поэтому создание перенаселенности на верхнем возбужденном уровне вполне реально. В системе взаимодействующих экситонов коэффициент усиления

$G$  довольно значителен и составляет около  $39$  см $^{-1}$ , а неупругое экситон-экситонное рассеяние приводит к смещению экситонной линии испускания в длинноволновую область спектра на величину более чем  $3/4\Delta E_{ex}$ , где  $\Delta E_{ex}$  — энергия связи экситона [4].

Из условия (6) следует, что

$$\Delta n_{ex}^1 = \Delta n_{ex},$$

$$d\Delta n_{ex}^1 / dt \gg d\Delta n_{ex}^0 / dt,$$

и уравнением (3') можно пренебречь.

Тогда система скоростных уравнений будет иметь следующий вид:

$$\frac{d\Delta n}{dt} = g - \sigma_{ex}\Delta n^2 + \alpha\Delta n_{ex}; \quad (1'')$$

$$\frac{d\Delta n_{ex}}{dt} = R_{ex}^B + (\beta - \alpha)\Delta n_{ex} + \sigma_{ex}\Delta n^2 - \Delta n_{ex}W_B\Delta n_{\phi}; \quad (2'')$$

$$\frac{d\Delta n_{\phi}}{dt} = \Delta n_{ex}W_B\Delta n_{\phi} - 2\kappa\Delta n_{\phi}. \quad (4'')$$

Нелинейные уравнения (1''), (2''), (4'') являются фундаментальными уравнениями экситонного лазера.

Рассмотрим наиболее простой случай стационарного решения. Тогда  $d\Delta n/dt = d\Delta n_{ex}/dt = d\Delta n_{\phi}/dt = 0$ , и система дифференциальных уравнений (1''), (2''), (4'') сводится к системе алгебраических уравнений

$$g - \sigma_{ex}\Delta n^2 + \alpha\Delta n_{ex} = 0; \quad (1''')$$

$$R_{ex}^B + (\beta - \alpha)\Delta n_{ex} + \sigma_{ex}\Delta n^2 - \Delta n_{ex}W_B\Delta n_{\phi} = 0; \quad (2''')$$

$$\Delta n_{ex}W_B\Delta n_{\phi} - 2\kappa\Delta n_{\phi} = 0. \quad (4''')$$

Решая эту систему, получим следующее уравнение для  $\Delta n_{\phi}$ :

$$\Delta n_{\phi} \left( \frac{(g + R_{ex}^B)W_B}{(B - \beta) + W_B\Delta n_B} - 2\kappa \right) = 0. \quad (9)$$

Это уравнение имеет два решения:

$$\Delta n_{\phi} = 0; \quad (10)$$

$$\Delta n_{\phi} = \frac{(g + R_{ex}^B)W_B - 2\kappa(\beta - B)}{2\kappa W_B}. \quad (11)$$



Равенство  $\Delta n_0 = 0$  означает, что фотонов нет, т. е. лазерная генерация отсутствует.

Рассмотрим решение (11) и, в частности, его числитель.

Если накачка лазера слабая, то сумма  $g + R_{ex}^B$  мала и тогда

$$(g + R_{ex}^B)W_B - 2\kappa(\beta - B) < 0. \quad (12)$$

Однако, поскольку число фотонов не может быть отрицательным, решение (11) не пригодно, то есть остается только решение (10). Следовательно в условиях слабой накачки генерация излучения отсутствует.

Если увеличить накачку так, чтобы выполнялось условие

$$(g + R_{ex}^B)W_B - 2\kappa(\beta - B) > 0 \quad (13)$$

или

$$(g + R_{ex}^B)W_B > 2\kappa(\beta - B), \quad (14)$$

решение (11) с  $\Delta n_{\phi} > 0$  становится возможным. Это соответствует условию лазерной генерации излучения (14). В стационарных условиях можно положить  $R_{ex}^B = \Delta n_{ex} / \tau$ . Тогда условие лазерной генерации (14) переписывается в виде

$$\left(g + \frac{\Delta n_{ex}}{\tau}\right)W_B > 2\kappa(\beta - B). \quad (15)$$

Формула для коэффициента усиления с учетом неупругого экситон-экситонного рассеяния получена в [4]. Из нее следует выражение для  $W_B$ :

$$W_B = \frac{2\pi}{\hbar} \frac{|V_{\mu\mu'}(0)|^2}{(kT)^2} |E' - \hbar\omega| \left(1 + \frac{kT}{\epsilon_s}\right)^{-1/2} \times \\ \times K_1 \left( \frac{|E' - \hbar\omega|}{kT} \left[1 + \frac{kT}{\epsilon_s}\right]^{1/2} \right), \quad (16)$$

где  $|V_{\mu\mu'}(0)|^2 = 13,28Q^2(16\pi^2 a_B^6 / V^2)$ ;

$V$  — объем кристалла;

$a_B$  — боровский радиус экситона;

$Q = e^2 / (2\epsilon_0 a_A)$ ;

$\epsilon_0$  — низкочастотная диэлектрическая проницаемость;

$\epsilon_s = (a_A / R_s)^2 Q$ ;

$R_s$  — эффективный радиус рассеяния,  $R_s = 2,38a_B$ ;

$K_1(x)$  — функция Макдональда;

$E'$  — положение центра кривой усиления.

С учетом выражений (14), (15), (16) и равенства  $t_0 = 1/(2\kappa)$  получим условие генерации в виде

$$\frac{2\pi}{\hbar} \frac{(g + \Delta n_{ex} / \tau) |V_{\mu\mu'}(0)|^2}{(kT)^2} |E' - \hbar\omega| \left(1 + \frac{kT}{\epsilon_s}\right)^{-1/2} \times \\ \times K_1 \left( \frac{|E' - \hbar\omega|}{kT} \left[1 + \frac{kT}{\epsilon_s}\right]^{1/2} \right) > \frac{\beta - B}{t_0}. \quad (17)$$

#### Анализ модели

Из формулы (17) видно, что время жизни фотона  $t_0$  в резонаторе лазера должно быть достаточно велико, а разность  $\beta - B$  мала. Следует отметить, что полученное условие генерации (17) характерно для системы взаимодействующих бозонов. Аналогичное

условие для фермионных систем, полученное в большинстве работ по лазерам, имеет вид [8, с. 37]

$$\frac{(N_2 - N_1)}{V\tau 8\pi\nu^2 \Delta\nu / c^3} > \frac{1}{t_0}, \quad (18)$$

где  $N_1, N_2$  — число атомов в основном и возбужденном состоянии, соответственно;

$\nu$  — частота света;

$\Delta\nu$  — ширина атомной линии;

$c$  — скорость света в лазерной среде.

Поскольку величина  $\Delta\nu$  прямо пропорциональна частоте перехода  $\nu$ , перепишем уравнение (18) так:

$$\frac{(N_2 - N_1)}{V\tau 8\pi\nu^3 / c^3} > \frac{1}{t_0}. \quad (19)$$

В пороговое условие генерации (19) входит величина  $\nu^3$ , поэтому очевидно, что для очень коротких волн левая часть этого выражения оказывается слишком малой чтобы выполнялось условие самовозбуждения лазера. Это одна из принципиальных трудностей, возникающих при создании гамма-лазеров для фермионных систем. Как видно из (17), для систем взаимодействующих бозонов эти трудности не возникают и поэтому именно их следует использовать в качестве рабочего вещества гамма-лазеров [6].

Таким образом, полученные скоростные уравнения экситонного лазера в системе взаимодействующих экситонов и условия инверсной населенности и генерации позволили указать на принципиально новую возможность создания гамма-лазера.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Benoit la Guillaume C., Debever J. M., Salvan F. Radiative recombination in highly excited CdS // Phys. Rev.— 1969.— N 177.— P. 567.
2. Magle D., Mahr H. Exciton-exciton interaction in CdS, CdSe and ZnO // Phys. Rev. Lett.— 1970.— N 24.— P. 890.
3. Грибковский В. П., Дроздов Н. А., Патрин А. А. и др. Излучательная рекомбинация свободных экситонов в ZnTe при высоком уровне оптического возбуждения // Журнал прикладной спектроскопии.— 1974.— № 21.— С. 1009. [Gribkovskii V. P., Drozdov N. A., Patrin A. A. i dr. // Zhurnal prikladnoi spektroskopii. 1974. N 21. P. 1009]
4. Молчанов Ф. Г., Попов Ю. М., Трупилин А. И. Усиление света в полупроводниках при рекомбинации экситонов высокой концентрации // Квантовая электроника.— 1974.— № 5.— С. 1258—1261. [Molchanov F. G., Popov Yu. M., Trupilin A. I. // Kvantovaya elektronika. 1974. N 5. P. 1258]
5. Нолле Э. Л. Вынужденное излучение света неидеальным экситонным газом в полупроводниках // Физика и техника полупроводников.— 1974.— Т. 8, № 8.— С. 1463—1470. [Nolle E. L. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 1974. Vol. 8, N. 8. P. 1463]
6. Гаркавенко А. С. Немесбауэровский гамма-лазер на основе прямозонных полупроводниковых соединений // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2001.— № 4—5.— С. 56—59. [Garkavenko A. S. // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature. 2001. N 45. P. 56]
7. Давыдов А. С. Теория твердого тела.— М.: Наука, 1976. [Davydov A. S. Moscow. Nauka, 1976]
8. Страховский Г. М., Успенский А. В. Основы квантовой электроники.— М.: Высшая школа, 1979. [Strakhovskii G. M., Uspenskii A. V. Moscow. Vysshaya shkola. 1979]

Д. ф.-м. н. Л. И. АНАТЫЧУК, А. В. ПРИБЫЛА

Украина, г. Черновцы,

Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины

E-mail: anatych@inst.cv.ua

Дата поступления в редакцию

02.07.2010 г.

Оппонент д. ф.-м. н. З. Д. КОВАЛЮК

(ЧО ИМП НАНУ, г. Черновцы)

## АНИЗОТРОПНЫЙ ТЕРМОЭЛЕМЕНТ В РЕЖИМЕ ГЕНЕРАЦИИ ЭДС И ТОКА

*Разработаны компьютерные методы и программы, позволяющие провести оптимизацию конструкции анизотропного термоэлемента, направленную на повышение его энергетических характеристик.*

В настоящее время для термоэлектрического преобразования энергии наиболее широко используются термопарные элементы, которым наряду с несомненными достоинствами присущи и недостатки, связанные с тем, что для получения необходимых электрических напряжений их необходимо соединять в последовательные цепи. Это приводит к усложнению конструкций и снижению их надежности. Также имеются технологические и эксплуатационные трудности, связанные с соединением материалов термопар. Все это стимулирует поиск иных термоэлектрических преобразователей энергии.

Одним из преобразователей, который не содержит приведенных выше недостатков, является анизотропный термоэлемент (АТ). Он представляет собой вырезанный соответствующим образом брусок из анизотропного материала и поэтому, в отличие от термопар, здесь не имеется проблем с коммутацией. Развиваемая им термо-эдс зависит от геометрических размеров кристалла, т. е. может возрастать до необходимой величины при простом увеличении отношения размеров его сечения.

Расчетам основных параметров анизотропного термоэлемента посвящено достаточно большое количество публикаций, однако все они проводились с какими-либо приближениями и упрощениями. Так, например, в [1—3 и др.] не учитывалось наличие токовых контактов, а в [4, 5 и др.] рассматриваются только точечные контакты; в [5, 6] рассмотрены сплошные контакты без учета протекания по ним тепла от нагревателя к холодильнику. В [1—4, 6 и др.] не учитываются температурные зависимости кинетических коэффициентов материала; в [5 и др.] только приближенно учитываются температурные зависимости свойств материала.

Такая ситуация легко объяснима, поскольку используемые в известных работах аналитические методы нахождения распределения тепловых потоков и электрического потенциала или вообще не позволя-

ют получить требуемые решения, или не дают необходимой точности. Поэтому, несмотря на достаточно большое число исследований, до настоящего времени не создана достаточно полная модель АТ, где учитывались бы одновременно и температурные зависимости свойств материала, и влияние реальных контактов конкретной конфигурации.

Целью настоящей работы является исследование свойств АТ с применением компьютерных методов вычисления для создания достаточно полных моделей анизотропного термоэлемента в режиме генерации ЭДС и тока.

**Ф**изическая модель АТ представлена на рис. 1. На верхней грани анизотропного бруска 2 размещен нагреватель 1, который создает в нем однородный тепловой поток. На нижней стороне бруска размещен термостат 6, который имеет большие, чем нижняя сторона бруска, размеры и находится в тепловом контакте с токовыми проводниками 4, электрически изолированными от термостата изоляцией 5. Между нагревателем 1, термостатом 6 и бруском 2 размещена электрическая изоляция 7. На боковых гранях бруска 2 размещены токовые пластины 3, размеры которых в направлении оси  $y$  меньше, чем размеры боковых поверхностей анизотропного бруска. Ток от анизотропного термоэлемента отводится проводниками 4 во внешнюю цепь с сопротивлением  $R$ . Боковые грани АТ изолированы как по температуре, так и электрически.

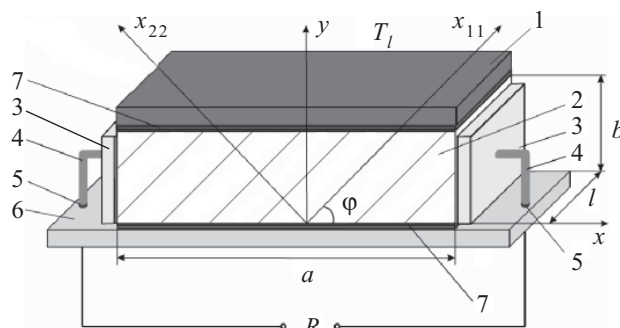


Рис. 1. Анизотропный термоэлемент:

1 — нагреватель; 2 — анизотропный брусок; 3 — токовые пластины; 4 — токовые проводники; 5 — электрическая изоляция проводников; 6 — термостат; 7 — электрическая изоляция термостата и нагревателя;  $x_{11}$ ,  $x_{22}$  — кристаллографические оси;  $R$  — внешняя нагрузка

Распределения потенциала и тока в термоэлементе описываются выражениями [7]

$$-\nabla \left[ \left( \hat{k}(T) + \hat{\alpha}(T)^2 \hat{\sigma}(T) T + \hat{\alpha}(T) U \hat{\sigma}(T) \right) \nabla T \right] - \nabla \left[ \left( \hat{\alpha}(T) \hat{\sigma}(T) T + U \hat{\sigma}(T) \right) \nabla U \right] = 0; \quad (1)$$

$$-\nabla (\hat{\sigma}(T) \hat{\alpha}(T) \nabla T) - \nabla (\hat{\sigma}(T) \nabla U) = 0, \quad (2)$$

полученными из законов сохранения энергии и электрического заряда, соответственно ( $\nabla$  — векторный дифференциальный оператор;  $\hat{\alpha}$ ,  $\hat{\sigma}$ ,  $\hat{k}$  — коэффициенты термо-эдс, электропроводности и теплопроводности). Приведенные уравнения являются дифференциальными уравнениями второго порядка в частных производных для искомых функций электрического потенциала  $U$  и температуры  $T$ , которые необходимо решать с соответствующими граничными условиями.

Для построения компьютерной модели был использован пакет прикладных программ Comsol Multiphysic, что дает возможность смоделировать задачу в виде краевой задачи

$$\nabla(-C \nabla M) = 0 \quad (3)$$

для матрицы

$$M = \begin{bmatrix} T \\ U \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Коэффициенты модели  $C$  получаются сравнением уравнений (1) и (2) с уравнением (3).

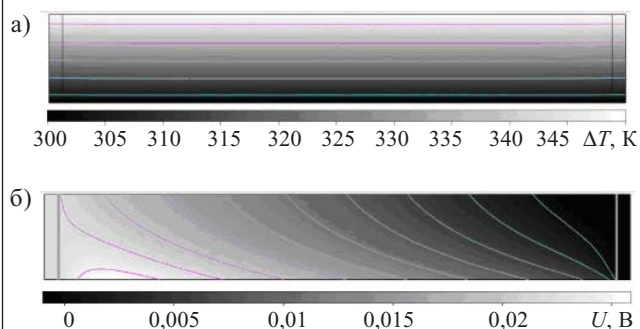


Рис. 2. Распределение температуры (а) и электрического потенциала (б) в АТ (линии соответствуют изотермическим (а) и эквипотенциальным (б) поверхностям)



Рис. 3. Линии плотности электрического тока (а) и вихревых термоэлектрических токов (б)

Моделирование физических полей в АТ позволяет определить распределения температуры, электрического потенциала и тока для термоэлементов произвольных размеров. На рис. 2, 3 приведены примеры таких распределений для термоэлемента размерами  $a=20$  мм,  $b=3$  мм при перепаде температуры в нем  $\Delta T=50$  К. Материал термоэлемента — монокристалл CdSb, сплошные токовые контакты — медные.

На рис. 3, а в области, соответствующей размещению электрических контактов, наблюдается возмущение линий плотности электрического тока, что вызвано наличием вихревых термоэлектрических токов. При помощи специальной технологии [7] было проведено «разделение токов» и получены линии распределения плотности последнего (см. рис. 3, б).

На основании полученных распределений потенциала и тока была проведена оптимизация АТ. С этой целью определялись зависимости основных энергетических характеристик АТ от перепада температуры в термоэлементе, его размеров и размещения токовых контактов.

Как следует из рис. 4 и 5, в заданном интервале температур величины ЭДС и КПД АТ возрастают с увеличением перепада температуры в термоэлементе. Полученные зависимости приближенно можно получить аналитическим способом, как это показано в [8]. Расчеты КПД АТ были проведены с учетом и без учета контактного электрического сопротивления на границе анизотропной пластины и металлических то-

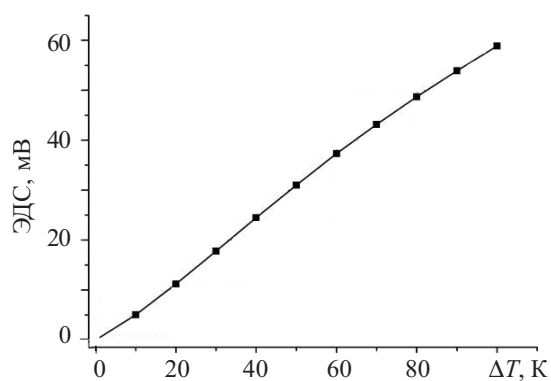


Рис. 4. Зависимость ЭДС АТ от перепада температуры

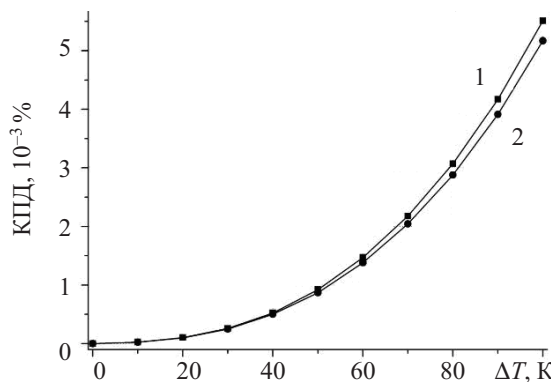


Рис. 5. Зависимость величины КПД АТ от перепада температуры без учета (1) и с учетом (2) контактного сопротивления



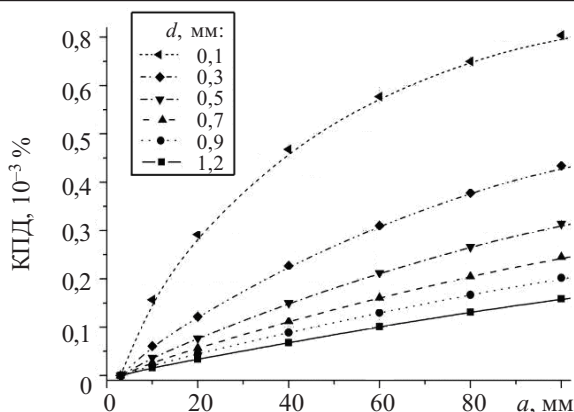


Рис. 6. Зависимость КПД АТ от длины  $a$  термоэлемента при разных значениях толщины  $d$  токовых контактов

ковых контактов (см. рис. 5). Установлено, что наличие контактного сопротивления ( $\rho_k = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ ) приводит к уменьшению КПД АТ на 3%. То есть очевидно, что оптимизация АТ должна включать в себя поиск оптимальных размеров и места размещения токовых контактов.

Из представленных на **рис. 6** зависимостей видно, что при одинаковых значениях длины анизотропного термоэлемента уменьшение толщины токовых контактов приводит к уменьшению КПД, связанному с увеличением тепловых потерь.

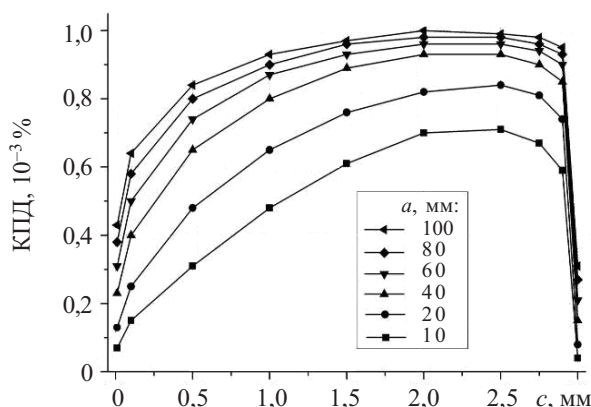


Рис. 7. Зависимость КПД АТ от ширины  $c$  токовых контактов при разных значениях длины  $a$  анизотропного термоэлемента шириной 3 мм

Анализ приведенных на **рис. 7** зависимостей показал, что оптимальная ширина токовых контактов не зависит от длины термоэлемента и составляет 2,2 мм. Установлено, что такое соотношение оптимальной ширины контакта и ширины АТ (приблизительно 2/3) сохраняется и при других размерах термоэлемента в исследуемом интервале температуры.

Также проведена оптимизация места размещения токовых контактов (расстояния  $h$  от края термоэлемента) на боковых гранях анизотропного бруска (**рис. 8**). Установлено, что при размещении токовых контактов в нижней части термоэлемента (возле холодного термостата) тепловые потери через контакты уменьшаются, что приводит к увеличению КПД.

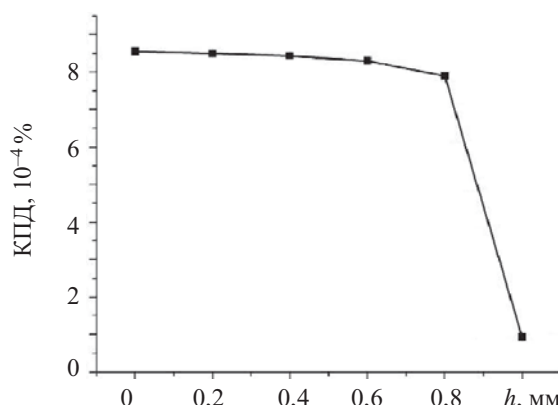


Рис. 8. Зависимость величины КПД АТ от размещения токовых контактов фиксированного размера

На основании расчетов был выбран вариант наиболее эффективной конструкции АТ с контактами оптимальных размеров, расположенными в нижней части термоэлемента. Это позволило повысить КПД анизотропного термоэлемента на 15%.

Таким образом, разработанные компьютерные методы и программы позволяют провести оптимизацию конструкции анизотропного термоэлемента, направленную на повышение его энергетических характеристик.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Снарский А. А., Трофимов С. С. // Физика и техника полупроводников.— 1983.— Т. 17, № 5. — С. 951—953. [Snarskii A. A., Trofimov S. S. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 1983. Vol. 17, N 5. P. 951]
2. Самойлович А. Г., Слипенченко В. Н. // Физика и техника полупроводников.— 1981.— Т. 15, № 50.— С. 965—967. [Samoilovich A. G., Slipchenko V. N. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 1981. Vol. 15, N 50. P. 965]
3. Бытенский Л. И., Гудкин Т. С., Иорданишвили Е. К., Фискинд Е. Э. // Физика и техника полупроводников.— 1978.— Т. 12, № 3. — С. 538—542. [Bytenskii L. I., Gudkin T. S., Iordanishvili E. K., Fiskind E. E. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 1978. Vol. 12, N 3. P. 538]
4. Охрем О. А. ЕРС вихрового анизотропного термоэлемента // Термоэлектрика.— 2002.— № 1.— С. 18—23. [Okhrem O. A. // Termoelektrika. 2002. N 1. P. 18]
5. Снарский А. А., Пальти А. М., Ащеулов А. А. Анизотропные термоэлементы. Обзор // Физика и техника полупроводников.— 1997.— Т. 31, № 11.— С. 1281—1298. [Snarskii A. A., Pal'ti A. M., Ashcheulov A. A. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 1997. Vol. 31, N 11. P. 1281]
6. Королук С. Л., Пилат И. М., Самойлович А. Г. и др. // Физика и техника полупроводников.— 1973.— Т. 7, № 4.— С. 725—734. [Korolyuk S. L., Pilat I. M., Samoilovich A. G. i dr. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 1973. Vol. 7, N 4. P. 725]
7. Прибила А. В. Особливості термоелектричних явищ у спіральному прямокутному анізотропному термоелементі поперечного типу // Термоэлектрика.— 2006.— №1.— С. 19—23. [Pribila A. V. // Termoelektrika. 2006. N 1. P. 19]
8. Самойлович А. Г. Термоэлектрические и термомагнитные методы превращения энергии.— Черновцы: Рута, 2006. [Samoilovich A. G. Chernovtsy. Ruta. 2006]

К. т. н. Е. В. ВОЙЦЕХОВСКАЯ, к. т. н. Л. Б. ЛИЦИНСКАЯ,  
к. т. н. А. А. ЛАЗАРЕВ

Украина, Винницкий национальный технический университет  
E-mail: pktavntu@mail.ru

Дата поступления в редакцию  
05.11 2010 г.

Оппонент к. т. н. В. А. БОЛТЕНКОВ  
(ОНПУ, г. Одесса)

## ИНДУКТИВНЫЙ НЕГАСЕНСОР

*Введение L-негатрона в схему индуктивного мостового сенсора позволяет повысить его чувствительность в три раза.*

В последние десятилетия современное производство сложно представить без систем автоматики, в которых необходим постоянный контроль различных физических величин (температуры, давления, линейного перемещения и др.). Основу систем контроля составляют сенсоры, которые должны иметь высокую чувствительность и точность преобразования неэлектрических воздействий в электрические сигналы, высокую степень защиты от влияния внешних факторов и должны сохранять работоспособность в заданном диапазоне температуры [1]. В настоящее время широкое применение находят индуктивные сенсоры, основное назначение которых — реагирование на металлический объект при его приближении к сенсору на определенное расстояние [2]. Такие сенсоры являются доступными, простыми, надежными и дешевыми элементами систем управления приводами, станками, автоматическими линиями, системами измерения физических величин и пр.

Существует несколько схем реализации индуктивных сенсоров: последовательная, трансформаторная, мостовая, частотная, схема на делителе напряжения [3]. Исходя из того, что самой надежной является мостовая схема, в настоящей работе исследуется индуктивный мостовой сенсор. Важным параметром индуктивных сенсоров является чувствительность к внешнему возмущению, когда воздействие физического объекта преобразуется в приращение индуктивности. В настоящей работе была поставлена задача повышения чувствительности такого сенсора путем использования в нем L-негатрона или его схемотехнического аналога [4, 5] — прибора, имеющего отрицательное значение дифференциальной индуктивности [6]. Реактивное сопротивление  $X_L^{(-)}$  негатрона также имеет отрицательное значение  $X_L^{(-)} = \omega L^{(-)} < 0$ , и его модуль растет с увеличением частоты.

### Анализ основных параметров индуктивного негасенсора

В индуктивных сенсорах, реализованных по схеме измерительного моста, к переменной индуктивности параллельно или последовательно подключается L-негатрон, позволяющий увеличить чувстви-

тельность сенсора. Такие устройства получили название негасенсоров.

Рассмотрим принципиальную схему индуктивного сенсора мостового типа, который является прототипом негасенсора (рис. 1, а).

Первичный измерительный преобразователь такого сенсора состоит из измерительного моста, выполненного на двух балластных резисторах  $R1$ ,  $R2$  одинакового номинала и двух катушек индуктивности — постоянной  $L$  и переменной  $L_X$ . В исходном состоянии значения индуктивности катушек также одинаковы. При внесении в поле переменной катушки металлического предмета будет изменяться значение ее индуктивности, которое выражается в изменении значения выходного напряжения сенсора

$$U_{\text{вых с}} = \frac{U_r \omega R (L_X - L)}{(R + \omega L)(R + \omega L_X)},$$

где  $U_r$  — напряжение генератора;

$\omega$  — циклическая частота;

$R$  — номинальное значение сопротивления резисторов  $R1$  и  $R2$ .

Коэффициент преобразования или абсолютная чувствительность такого сенсора определяется как производная выходного напряжения по  $L_X$ :

$$K_{\text{пр с}} = \frac{dU_{\text{вых с}}}{dL_X} = \frac{U_r \omega R}{(R + \omega L_X)^2}.$$

Относительная чувствительность сенсора равна

$$S_c = \frac{dU_{\text{вых с}}}{L_X} \frac{L_X}{U_{\text{вых с}}} = \frac{L_X (R + \omega L)}{(L_X - L)(R + \omega L_X)}.$$

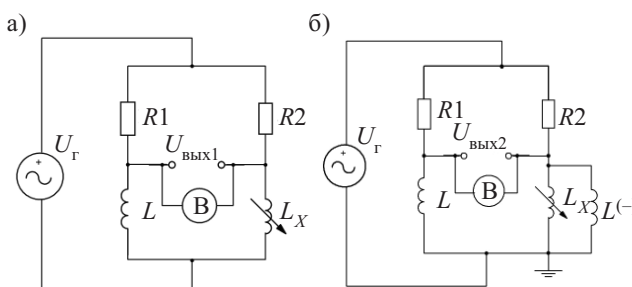


Рис. 1. Схемы индуктивного сенсора-прототипа (а) и негасенсора (б) на схемотехническом L-негатроне

В целях повышения чувствительности сенсора-прототипа параллельно индуктивности первичного измерительного преобразователя подключен  $L$ -негатрон, как это показано на рис. 1, б (обозначен как  $L^{(-)}$ ). При этом в качестве негатрона можно использовать как физические негатроны, так и их схмотехнические аналоги.

Значение выходного напряжения такого негасенсора определяется соотношением

$$U_{\text{вых н}} = - \frac{[L(L^{(-)} + L_X) - L^{(-)}L_X]RU_r\omega}{(R + \omega L)[L_X R + L^{(-)}(R + \omega L_X)]}, \quad (1)$$

а коэффициент преобразования равен

$$K_{\text{пр н}} = \frac{dU_{\text{вых н}}}{dL_X} = \frac{L^{(-)2}U_r\omega R}{[L_X R + L^{(-)}(R + \omega L_X)]^2}. \quad (2)$$

Относительная чувствительность будет иметь вид

$$S_n = K_{\text{пр н}} \frac{L_X}{U_{\text{вых н}}} = - \frac{L^{(-)2}L_X(R + \omega L)}{[-L^{(-)}L_X + L(L^{(-)} + L_X)][L_X R + L^{(-)}(R + \omega L_X)]}. \quad (3)$$

Анализ формул (1)–(3) показывает, что абсолютная чувствительность будет больше единицы при выполнении условия  $L^{(-)2}U_r\omega R > [L_X R + L^{(-)}(R + \omega L_X)]^2$ , а относительная — при выполнении условия

$$L^{(-)2}L_X(R + \omega L) > [-L^{(-)}L_X + L(L^{(-)} + L_X)] \times [L_X R + L^{(-)}(R + \omega L_X)].$$

Как следует из расчетных графиков, представленных на рис. 2, выходное напряжение негасенсора с параллельным подключением  $L$ -негатрона максимально при  $L^{(-)} = -150$  мкГн и растет с увеличением значения  $L_X$ .

Из графиков расчетной зависимости абсолютной и относительной чувствительности негасенсора с па-

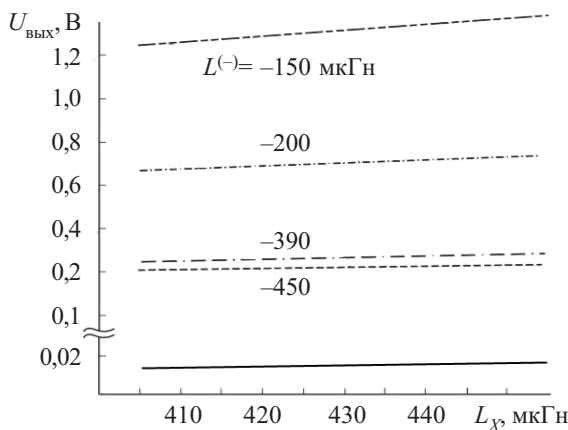


Рис. 2. Зависимость выходного напряжения сенсора-прототипа (сплошная линия) и негасенсора при различных значениях отрицательной индуктивности от индуктивности  $L_X$

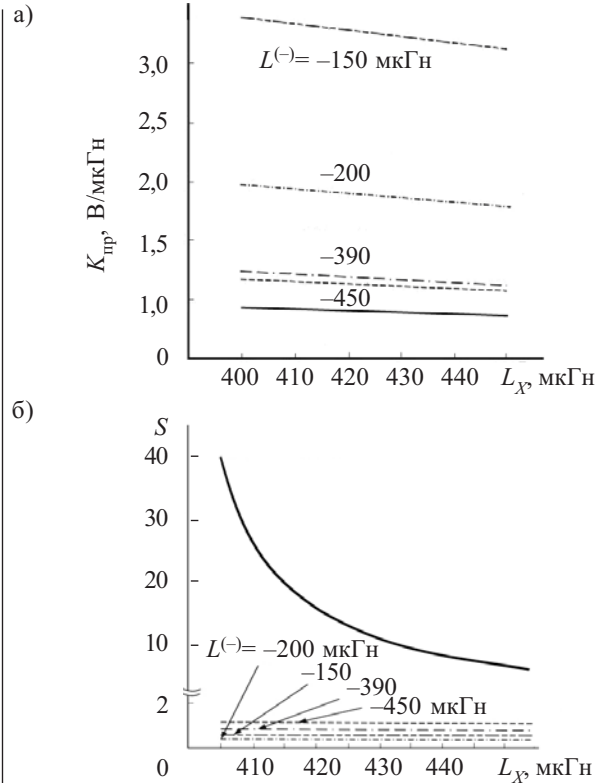


Рис. 3. Зависимость коэффициента преобразования  $K_{\text{пр}}$  (а) и относительной чувствительности  $S$  (б) сенсора-прототипа (сплошная линия) и негасенсора при различных значениях отрицательной индуктивности от индуктивности  $L_X$

раллельным подключением  $L$ -негатрона, представленных на рис. 3, следует, что с увеличением  $L_X$  абсолютная чувствительность негасенсора растет, а относительная падает, что свидетельствует о возможности стабилизации работы схемы индуктивного негасенсора. Максимальное значение абсолютной чувствительности негасенсора наблюдается при  $L^{(-)} = -150$  мкГн, а относительной чувствительности — при  $L^{(-)} = -450$  мкГн. Кроме того, использование отрицательной индуктивности позволяет скомпенсировать паразитную индуктивность проводников и электрических соединений, паразитную индуктивность пленки резисторов и др. Это дает возможность предотвратить потери энергии преобразования неэлектрической величины в электрическую, что также приводит к повышению чувствительности устройства.

#### Экспериментальные исследования

Для экспериментального подтверждения полученных теоретических положений был разработан макет, в котором реализован сенсор-прототип и негасенсор с параллельно подключенным  $L$ -негатроном, в качестве которого использован его схмотехнический аналог. На рис. 4 показана принципиальная схема и макет негасенсора на схмотехническом  $L$ -негатроне, выполненном в виде конвертора иммитанса на операционном усилителе.

Макет представляет собой собранный на одной плате сенсор и схмотехнический аналог  $L$ -негатро-



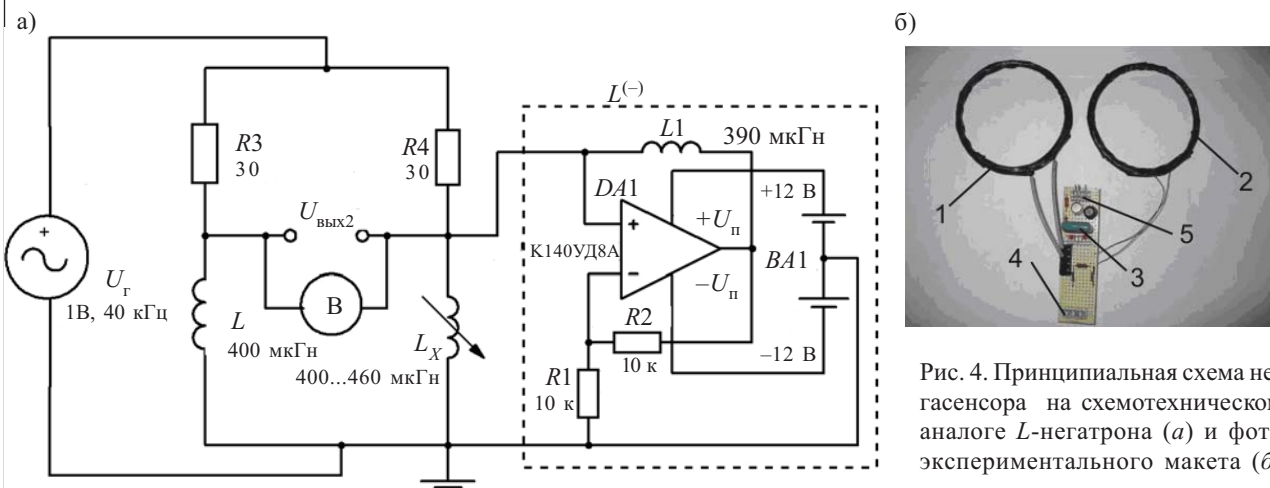


Рис. 4. Принципиальная схема негасенсора на схемотехническом аналоге  $L$ -негатрона (а) и фото экспериментального макета (б)

на  $L^{(-)}$ , который коммутируется к сенсору с помощью переключателя для реализации негасенсора. Индуктивный датчик состоит из катушки индуктивности первичного измерительного преобразователя  $L$ , постоянной катушки индуктивности  $2$ , двух балластных резисторов  $R$ . Катушки  $L$  и  $L_X$  конструктивно идентичны и представляют собой 50 витков провода ПЭЛ-0,8, намотанного на оправу диаметром 10 см. Схемотехнический аналог  $L$ -негатрона реализован на базе операционного усилителя  $DA1$  типа К140УД8А с положительной обратной связью в виде дросселя  $L1$  по неинвертирующему входу и с делителем напряжения ( $R1, R2$ ), определяющим коэффициент усиления операционного усилителя. Питание операционного усилителя  $DA1$  обеспечивает двуполярный источник питания  $BA1$  — с напряжением  $\pm 12$  В. На плате установлены разъемы 4, 5 для подключения генератора ГЗ-118, осциллографа С1-93 и источника питания. Макет построен таким образом, что позволяет проводить отдельное исследование как сенсора-прототипа, так и негасенсора. Для переключения служат переключки 3.

При исследовании сенсора-прототипа с генератора на вход датчика подавался синусоидальный сигнал частотой 40 кГц и амплитудой 1 В. На выходе с помощью осциллографа контролировалось изменение напряжения. В качестве объекта, на который реагировал датчик, использовали железную пластину диаметром около 12 см.

В отсутствие внешнего воздействия напряжение на выходе датчика-прототипа практически нулевое — 40 мВ (существует небольшой разбаланс моста за счет расхождения номиналов балансных резисторов и неточности выполнения индуктивности). При приближении металлического предмета напряжение на выходе увеличивается. Максимальное расстояние, на котором датчик-прототип реагировал на предмет, составило 4,5 см, а напряжение на этом расстоянии изменялось на 1—5 мВ. В случае максимального приближения предмета к катушке изменение напряжения составляет 50 мВ.

Для исследования негасенсора, как и в первом случае, с генератора подавался сигнал частотой 40 кГц амплитудой 1 В. Если в состоянии покоя негасенсора подключить  $L$ -негатрон, на выходе появляется пороговое напряжение амплитудой 1 В, что объяс-

няется усилительными свойствами операционного усилителя и свойством индуктивности  $L1$  поворачивать фазу сигнала на  $180^\circ$ . При поднесении к негасенсору металлической пластины, минимальное изменение напряжения, которое наблюдалось уже на расстоянии 8—9 см, также составляло 1—5 мВ, что в два раза больше, чем у прототипа. Максимальное изменение напряжения негасенсора при максимальном приближении предмета к катушке  $L_X$  составило 400 мВ, т. е. в четыре раза больше, чем у прототипа.

Проведенные экспериментальные исследования в достаточной степени согласуются с полученными теоретическими расчетами, отклонение составляет не более 15%.

\*\*\*

Таким образом, проведенные исследования показали, что реализованный индуктивный негасенсор мостового типа на  $L$ -негатроне по сравнению с датчиком-прототипом имеет в три раза большую абсолютную чувствительность к изменению входной физической величины. Такие датчики весьма перспективны как датчики положения относительно металлических масс.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Джексон Р. Г. Новейшие датчики. — М.: Техносфера, 2007. [Dzhekson R. G. Moscow. Tekhnosfera. 2007]
2. Габов А. П., Рыжов С. Н. Так что же это за «хитрость» — индуктивный датчик приближения? // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2005. — № 12. — С. 36—39. [Gabov A. P., Ryzhov S. N. // Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. 2005. N 12. P. 36]
3. Алейников А. Ф., Гридчин В. А., Цапенко М. П. Датчики (перспективные направления развития) / Под ред. М. П. Цапенко. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. [Aleinikov A. F., Gridchin V. A., Tsapenko M. P. / Pod red. M. P. Tsapenko. Novosibirsk. Izd-vo NGTU 2001]
4. Войцеховська О. В., Лазарев О. О., Філінюк М. А. Дослідження індуктивних негасенсорів на  $L$ -негатронах // Матер. IV Міжнар. наук.-техніч. конф. «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування». — Україна, м. Вінниця. — 2009. — С. 77. [Voitsekhovs'ka O. V., Lazarev O. O., Filinyuk M. A. // Mater. IV Mizhnar. nauk.tekhnich. konfer. «Suchasni problemi radioelektroniki, telekomunikatsii ta priladobuduvannya». Ukraine, m. Vinnitsya. 2009. P. 77.]
5. Філінюк М. А., Лазарев О. О. Аналіз чутливості електронних кіл з  $L$ -,  $C$ -негатронами // Вісник Житомирського інженерно-технологіч. ін-ту. — 2003. — № 2. — С. 92—98. [Filinyuk M. A., Lazarev O. O. // Visnik Zhitomir's'kogo inzhenernotekhnologich. intu. 2003. N 2. P. 92]
6. Філінюк М. А. Основи негatronіки: Т. 1: Теоретичні і фізичні основи негatronіки. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. [Filinyuk M. A. Vinnitsya. UNIVERSUM Vinnitsya. 2006]

Д. ф.-м. н. А. Н. ГОРБАНЬ, к. т. н. В. В. КРАВЧИНА

Украина, Запорожский классический приватный университет;  
Запорожская государственная инженерная академия  
E-mail: kravchina@list.ru

Дата поступления в редакцию  
31.01 2011 г.

Оппонент к. т. н. Л. И. САМОТОВКА  
(НИИ микроприборов НАНУ, г. Киев)

## РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПЛЕМЕНТАРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ РАДИАЦИОННО СТОЙКИХ ИС

*Технология формирования ИС с полной диэлектрической изоляцией, объединяющая разные технологии, позволила получить значения токов утечки ИС на уровне единиц микроампера при прямом импульсном токе в 0,5 А.*

При разработке радиационно стойких ИМС с малыми токами утечки обычно применяют кремниевые структуры с диэлектрической изоляцией (КСДИ). Такие структуры получают с помощью технологий формирования диэлектрических пленок оксида кремния ( $\text{Si}^*$ ) или технологий срачивания пластин с помощью диэлектрических пленок с последующим использованием процессов транзисторирования и получения областей («карманов») монокристаллического кремния, изолированных диэлектрическими пленками (например, пленками оксида кремния  $\text{SiO}_2$ ). Подобные технологии формирования КСДИ имеют ограничение по минимальной толщине областей монокристаллического кремния (2—3 мкм). Необходимость получения малых токов утечки ИМС ( $I_0=10\text{—}100$  мкА), высокой частоты обмена сигналов информации, высоких коэффициентов усиления ( $\beta=40\text{—}70$ ) сигналов разной полярности и больших импульсных токов коллектора ( $I_k=0,5$  А) биполярных транзисторов в активном режиме делает невозможным использование горизонтальных транзисторов. Это обуславливает необходимость разработки конструкции и технологии формирования комплементарных вертикальных транзисторов, которые могут обеспечить указанные характеристики.

При изготовлении таких транзисторных структур в технологии КСДИ для формирования областей монокристаллического кремния противоположного типа проводимости можно использовать процессы перекompенсации примеси подложки с помощью дополнительных процессов диффузии легирующей примеси. Но по технологии КСДИ достаточно сложно получать транзисторные структуры в слоях кремния толщиной 2—4 мкм.

Целью настоящей работы была разработка конструкции вертикальных комплементарных транзисторов с полной диэлектрической изоляцией, разработка новых технологических процессов создания на их основе радиационно стойких ИС с параметрами, которые обеспечивают низкие значения тока утечки наря-

ду со значительными величинами прямого тока и пробивного напряжения при частоте обмена сигналов информации на уровне 500 кГц.

Возможность технологического формирования и использования слоев кремния толщиной 2—4 мкм с точно определенными параметрами в отсутствие многократовой перекompенсации примесей была достигнута за счет объединения технологии изготовления КСДИ с технологией «Изопланар». При этом за счет внедрения процессов эпитаксии появляется возможность формирования на пластинах КСДИ слоев монокристаллического кремния необходимой толщины, что позволяет создавать комплементарные вертикальные транзисторные структуры с нужными частотными и вольт-амперными характеристиками.

Технология изготовления структур с вертикальными комплементарными транзисторами была опробована при изготовлении ИС 1567АП1 и 1567АП2. ИС 1567АП1 представляет собой двухканальный дифференциальный приемник сигналов в коде RZ по ОСТ (ARNIC-429) с мультиплексором каналов на общие выходные формирователи сигналов информации и строба с частотой 250 кГц. ИС 1567АП2 является передатчиком сигналов в коде RZ по ОСТ (ARNIC-429) на частоте 250 кГц на линию из витой пары. Назначение предложенной системы передачи сигналов состоит в реализации физического уровня междуприборного интерфейса измерительных, контролируемых и управляемых комплексов, например навигационных комплексов. Система обеспечивает обмен цифровой информацией в широком диапазоне скорости передачи, при этом на приемном конце восстанавливаются импульсы синхронизации.

Для формирования симметричных положительных и отрицательных импульсов радиационно стойких ИМС в соответствии с ОСТ были разработаны электрические схемы на основе комплементарных транзисторов, через один из которых в прямом направлении питания протекает импульсный ток величиной 0,5 А, а ток утечки ИМС в таких схемах при температуре 125°C меньше 100 мкА.

При разработке ИМС проводилось исследование процессов локальной эпитаксии монокристаллического кремния с формированием локальной изоляции, которая совмещалась с диэлектрической изоляцией структур КСДИ, чем обеспечивалось формирование полной диэлектрической изоляции структур эле-

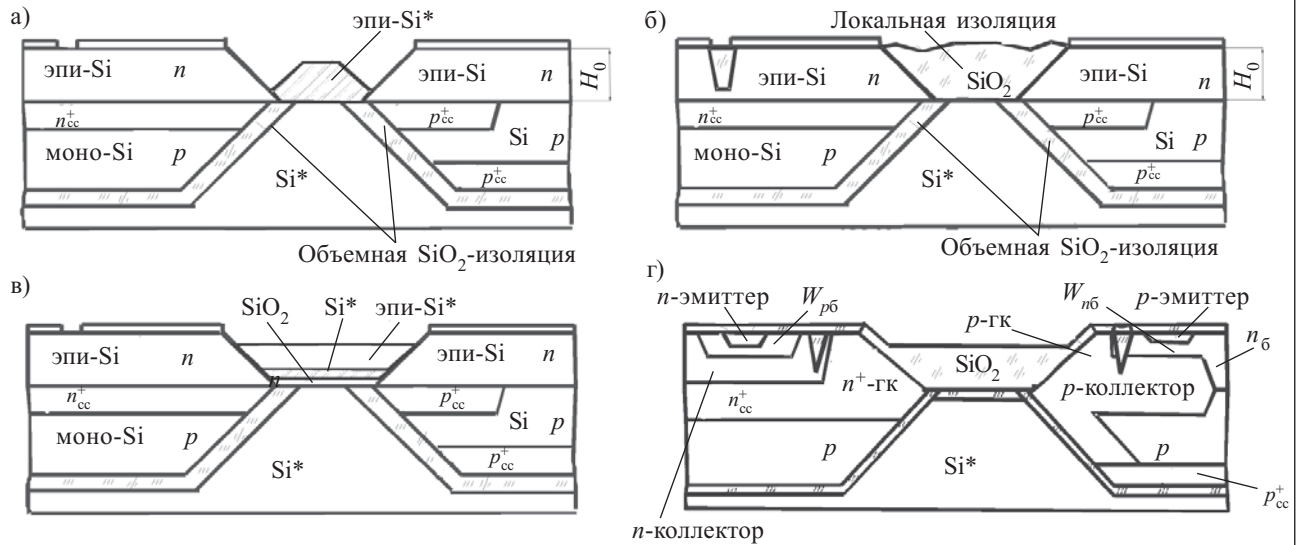


Рис. 1. Схемы структур ИМС:

*а* — формирование пленок эпи-Si\* с *W*-подобным рельефом; *б* — сращивание областей объемной SiO<sub>2</sub>-изоляции структур КСДИ или выращиваемых пластин с локальной боковой SiO<sub>2</sub>-изоляцией в области эпитаксиальных пленок; *в* — формирование пленок эпи-Si\* с дополнительными пленками SiO<sub>2</sub> и Si\*; *г* — структура комплементарных вертикальных транзисторов ( $n^+$ ,  $p^+$  — скрытые слои легирующих примесей;  $n^+$ -гк,  $p$ -гк — глубокие коллекторы;  $W_{pb}$ ,  $W_{nb}$  — толщина базы соответственно  $n$ - $p$ - $n$ - и  $p$ - $n$ - $p$ -транзисторов)

ментов ИМС. Первоначально эпитаксия монокристаллического кремния проводилась на подложки из поликристаллического кремния (Si\*), которые содержат области монокристаллического кремния (Si)  $p$ -типа проводимости (карманы). Процессы эпитаксии проводилась из газовой фазы тетрахлорида кремния на установке УНЕС-2Г. При этом формировалась эпитаксиальная пленка монокристаллического кремния  $n$ -типа проводимости, легированная примесями фосфора, с удельным сопротивлением 1 Ом·см. Эволюция рельефа поверхности изучалась при помощи растровой электронной микроскопии [1—4]. На **рис. 1** показаны схемы структур ИМС после эпитаксии и формирования локальной боковой изоляции, которая контактирует с объемной изоляцией КСДИ.

В областях над карманами из монокристаллического кремния Si (100) формируется эпитаксиальный монокристаллический кремний (эпи-Si). Над областями из поликремния Si\* и SiO<sub>2</sub>-изоляции первого уровня осаждаются эпитаксиальный поликристаллический кремний (эпи-Si\*). При температуре эпитаксии 1050°C толщина слоя эпи-Si\* составляет от 1/2 до 2/3 значения толщины слоя эпи-Si  $H_0$  (рис. 1, *а*). Уменьшение толщины области Si\* наблюдается на границе с монокристаллическим кремнием и в областях с большой плотностью монокристаллического эпи-Si, что объясняется концентрационными отличиями газовых потоков вследствие преобладающей скорости роста эпи-Si в направлении [100]. Толщина слоя эпитаксиального кремния над областями оксида кремния (объемной изоляции подложки КСДИ) составляет около 1/3  $H_0$ .

Кинетика процессов осаждения кремния в области оксида кремния отмечается селективностью скорости осаждения в зависимости от температуры. При снижении температуры до 800—900°C и уменьшении расхода хлора скорость осаждения эпи-Si\* увеличивается. Исследование процессов эпитаксии на поверхности SiO<sub>2</sub> большой площади показало, что

образование и увеличение зародышей новой фазы Si\* происходит в отдельных локальных областях, что приводит к осаждению и росту новой фазы в виде отдельных шариков или их половинок с радиусом 1,5—5,5 мкм. Если повысить температуру до 1050°C, то роста эпи-Si\* над областями из оксида кремния не происходит. Подобная зависимость наблюдается и при более низкой температуре при повышении расхода хлора. При температуре 1050°C скорость травления хлором образующихся на поверхности SiO<sub>2</sub> зародышей фазы Si\* превышает скорость их формирования. При температуре 800°C скорость травления уменьшается, и образование частичек фазы Si\* происходит более интенсивно, что в дальнейшем обеспечивает формирование комфотерных структур. Такие структуры имеют плавный рельеф, что создает приемлемые условия для формирования пленок металлизации и применения планарной технологии в целом. Однако при температуре 800°C формируется недопустимо большое количество дефектов в пленке эпитаксиального Si (100). Скорость роста эпитаксиальных пленок Si (100) почти на порядок выше скорости роста эпитаксиальных пленок Si (111) на боковых поверхностях выступов монокристаллического Si (100).

Рассмотрим особенности разработанной технологии изготовления ИМС. Внешний вид поверхности и скола кристалла ИС после эпитаксии при температуре 1050°C показан на **рис. 2**, где видно, что плоские поверхности карманов монокристаллического кремния разделены рельефными участками поликристаллического кремния. При температуре эпитаксии 1050°C формирование эпитаксиального кремния на поверхности объемной SiO<sub>2</sub>-изоляции происходит за счет роста и увеличения объема соседних боковых поверхностей поликристаллического кремния с одной стороны и монокристаллического кремния — с противоположной стороны (рис. 1). Вследствие наличия двух областей SiO<sub>2</sub>, разделенных Si\*, и кинетических отличий процесса роста пленок эпитакси-



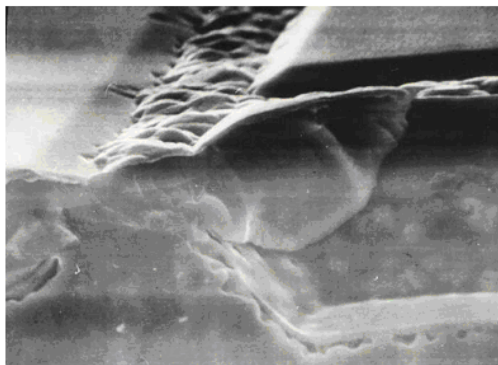


Рис. 2. Поверхность и скол кристалла ИМС после формирования эпитаксиальных пленок Si в области карманов из моно-Si и эпи-Si\* в области из поликристаллического кремния и слоя SiO<sub>2</sub> (толщиной 1 мкм) объемной изоляции структур КСДИ

ального поликристаллического кремния Si\* на разных материалах в области изоляции КСДИ-структур при эпитаксии формируется W-подобный рельеф поверхности [2, 3], впадины которого формируются над областями SiO<sub>2</sub> (рис. 1). Такой рельеф позволяет проводить процесс окисления и формирования локальной SiO<sub>2</sub>-изоляции с планарной поверхностью без предварительного дополнительного травления для формирования углублений, необходимых для получения полной изоляции.

Кроме того, W-подобный рельеф с наклонными боковыми поверхностями обеспечивает уменьшение механических напряжений (в отличие от канавок с вертикальными боковыми поверхностями в классической технологии «Изопланар») при термическом формировании толстых пленок локальной изоляции и исключает процессы генерации дефектов кристаллической решетки в эпитаксиальных слоях монокремния. Эпитаксиальные пленки также отличаются от монокремния подложек отсутствием дефектов, которым соответствуют глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне. Благодаря этому уменьшается обратный ток  $p-n$ -переходов и создаются условия для получения малых токов утечки ИМС. Технология формирования ИС с полной диэлектрической изоляцией, объединяющая разные технологии, позволила получить значения токов утечки ИС на уровне единиц микроампера при прямом импульсном токе в 0,5 А.

С целью расширения технологических и конструктивных возможностей создавались структуры с увеличенной толщиной эпитаксиального слоя (3—4 мкм). В этом случае применялась также и технология сращивания монокристаллических пластин с использованием технологий КНИ. По технологии эпи-КСДИ перед эпитаксией в области изоляции создавались дополнительные пленки оксида кремния и поликристаллического кремния, как это показано на рис. 1, в [4]. Защита поликристаллическим кремнием поверхности дополнительной пленки SiO<sub>2</sub> обеспечивала осаждение эпитаксиальных пленок только на области монокристаллического и поликристаллического кремния и делала поверхность структур более комфортной. Толщина слоя эпи-Si\* составляла 2,6—2,8 мкм, а поскольку максимальная толщина оксида кремния локальной изоляции обычно составляет 2,0—2,5 мкм,

необходимо было произвести травление эпи-Si\* для частичного удаления слоя (толщиной в 1,2—2,4 мкм). Остаточная толщина полученного слоя эпи-Si\* составляет 1,2—1,4 мкм. Таким образом, появляется дополнительная возможность корректирования планарности поверхности изоляции ИС [4] путем выбора необходимой толщины дополнительной пленки оксида кремния.

При вертикальной конструкции комплементарных транзисторов (рис. 1, з) необходимо сформировать глубокие коллекторы, диффузионные области которых для  $p-n-p$ -транзисторов формируют одновременной диффузией в объем эпитаксиальной пленки примеси из скрытого слоя ( $p_{ss}^+$ ) поверхности кремния подложки с одной стороны и из газовой фазы через поверхность эпитаксиального кремния — с другой стороны. Для уменьшения сопротивления и времени диффузии можно использовать открытые области боковых участков эпитаксиального монокристаллического кремния, которые расположены ближе к поверхности скрытых слоев [4]. Конструкция  $p-n-p$ -транзисторов предусматривает формирование базы в слое кремния эпитаксиальной пленки, а для формирования базы  $n-p-n$ -транзисторов используются более низкоомные области легированного бором кремния. В области более высокоомной базы  $p-n-p$ -транзисторов возникают объемные обедненные слои большей толщины и, соответственно, толщина базы  $p-n-p$ -транзисторов должна быть больше, чем толщина базы  $n-p-n$ -транзисторов. Следовательно, сначала происходит загонка примеси бора и начало отжига диффузионных областей эмиттеров  $p-n-p$ -транзисторов, а затем загонка примеси фосфора эмиттеров  $n-p-n$ -транзисторов. После этого проводят совместный финишный отжиг с окончательным формированием диффузионных областей обоих типов эмиттеров. При этом базовые области  $p-n-p$ -транзисторов формируют с помощью встречных процессов диффузии бора с эмиттерного и коллекторного слоев. Уровень последнего задает глубину перехода «база–коллектор» и первоначально формируется в процессе эпитаксии и при формировании слоя глубокого коллектора. Расположение этого уровня моделируется при последующих операциях формирования базы  $n-p-n$ -транзисторов, эмиттеров  $p-n-p$ - и  $n-p-n$ -транзисторов. Так,  $n-p-n$ -транзисторы имеют структуру дрейфового транзистора со встроенным ускоряющим электрическим полем в базовой области со ступенчатым коллекторным переходом. Для  $p-n-p$ -транзисторов характерна структура бездрейфового транзистора с более плавным коллекторным переходом. В  $p-n-p$ -транзисторе происходит моделирование обедненного объемного слоя: уменьшение толщины в области диффузионного коллектора и увеличение его толщины в области базы с относительно высокоомным слоем эпитаксиального кремния.

При формировании эпитаксиального слоя толщиной 2,2 мкм с удельным сопротивлением 0,85—1,05 Ом·см значение пробивного напряжения  $U_{кз}$  «коллектор–эмиттер» составило 14—17 В при коэффициенте усиления  $\beta=60$  для  $n-p-n$ -транзисторов и 22—24 В при  $\beta=30—35$  для  $p-n-p$ -транзисторов. После оптимизации конструкции и технологических режимов ВАХ транзисторов и параметры ИМС в целом улучшились. Так, при увеличении удельного сопротивления эпитак-

сиального слоя до 1,0—1,25 Ом·см и его толщины до 2,5 мкм для  $n-p-n$ -транзисторов получены значения  $U_{\text{кз}} = 19\text{—}22$  В при  $\beta=60$ , а для  $p-n-p$ -транзисторов —  $U_{\text{кз}} = 28\text{—}30$  В при  $\beta=35\text{—}45$  при уменьшении толщины базы с 0,8 до 0,7 мкм. Обратное напряжение пробоя  $U_{\text{бз}}$  эмиттерного перехода составило  $U_{\text{бз}}=8$  В. Эта величина обеспечивается благодаря наличию обедненного слоя, перекрывающего  $n$ -базу  $p-n-p$ -транзистора, толщиной  $W_6$ , которую можно рассчитать по формуле [5]

$$W_6 = W_{\text{бопр}} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{U_6}{U_{\text{бопр}}}} \right), \quad (1)$$

где  $W_{\text{бопр}}$  — толщина обедненного слоя при напряжении лавинного пробоя  $U_{\text{бопр}}=100$  В кремния базового слоя неограниченных размеров с концентрацией легирующей примеси фосфора  $N_d=5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

В соответствии с формулой (1), напряжение  $U_6=8$  В обеспечивается при толщине слоя кремния базы 0,7 мкм, а обедненному слою  $p$ -области коллекторного  $p-n$ -перехода с распределением легирующих примесей, близким к линейному, соответствует падение напряжения в 20—22 В, что в сумме определяло значение напряжения пробоя «коллектор–эмиттер» в 28—30 В.

Для исследуемых комплементарных транзисторов зависимость коэффициента передачи тока  $\beta_F$  в схеме с общим эмиттером в активном режиме работы транзистора от концентрации легирующих примесей эмиттера и базы, а также от толщины  $W_6$   $n$ -базы  $p-n-p$ -транзистора можно записать как [5, 6]

$$\beta_F = \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{W_6}{L_p} \right)^2 \frac{1}{\eta} + \frac{D_{n3} Q_{60}}{D_{p6} Q_{30}} \right]^{-1}, \quad (2)$$

где  $L_p$  — диффузная длина дырок в  $n$ -базе,  $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$ ;  $\eta$  — коэффициент, величина которого зависит от наличия в базе встроенного электрического поля, для  $p-n-p$ -транзистора  $\eta=1$ , а для  $n-p-n$ -транзистора  $\eta=2\text{—}4$  и больше;

$D_p, \tau_p$  — соответственно коэффициент диффузии и время жизни дырок в  $n$ -базе;

$D_{n3}, D_{p6}$  — коэффициенты диффузии соответственно электронов в эмиттере и дырок в базе;

$Q_{60}$  и  $Q_{30}$  — плотности зарядов ионизирующих примесей в базе и эмиттере, соответственно.

Для  $n-p-n$ -транзистора формула (2) записывается аналогично.

Конструкция комплементарных транзисторов, которые сформированы в достаточно тонких пленках эпитаксиального кремния, позволяет получить приемлемые коэффициенты усиления при значительных пробивных напряжениях. Для их реализации эмиттерные слои транзисторов формировали так, чтобы получить значительный коэффициент инжекции, что и обеспечивало формирование относительно больших импульсных коллекторных токов. Такая величина коэффициентов инжекции обеспечивалась высоким уровнем легирования эмиттерных областей с концентрацией легирующей примеси около  $10^{21} \text{ см}^{-3}$  и технологическими условиями сохранения высокого уровня интегрального заряда ионизирующих примесей

эмиттеров до конечного этапа формирования ИМС. Зависимость коэффициента инжекции  $\gamma$  от концентрации легирующих примесей для  $p-n-p$ -транзистора можно записать как [6]

$$\gamma = \left( 1 + \frac{Q_6 D_{n3}}{Q_3 D_{p6}} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где  $Q_6, Q_3$  — заряд ионизирующих примесей в  $n$ -базе и  $p$ -эмиттере, соответственно,  $Q_6 = N_{d6} W_6$ ,  $Q_3 = N_{a3} x_3$ ;

$N_{d6}, N_{a3}$  — концентрация легирующих примесей соответственно базовых и эмиттерных слоев;  $x_3$  — толщина эмиттерного слоя.

Для  $n-p-n$ -транзистора формула (3) записывается аналогичным образом.

Технология дальнейшего формирования ИС предусматривает сохранение высоких значений коэффициентов инжекции. При этом предполагается соблюдение определенных предосторожностей, например предотвращение растворения кремния в пленке алюминия в области контакта, что позволяет использовать сплавы алюминия с кремнием, и др. Применение известных решений, таких как формирование металлизации с контактами Шоттки или защита контактов пленками поликристаллического кремния  $\text{Si}^*$ , также помогают сохранить достаточно высокие значения коэффициентов инжекции. В свою очередь, формирование подобных контактов позволяет повысить быстродействие как отдельных транзисторов, так и схемы в целом.

Поскольку полученные значения предельной частоты транзисторов составляли не менее 150 МГц, а требуемая рабочая частота при применении микросхемы не превышает 1 МГц, обеспечивался достаточный запас по частоте, и частотная зависимость коэффициента усиления не нуждалась в дополнительном анализе.

\*\*\*

С помощью разработанной конструкции и технологии изготовления вертикальных комплементарных транзисторов получены ИС с полной диэлектрической изоляцией. При величине максимального коллекторного тока 0,5 А значения токов утечки функционирующих ИС составляют единицы микроампера.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Горбань А. Н., Кравчина В. В., Костенко В. В., Кравчина А. В. Дослідження процесів локального осадження плівок кремнію // Тр. IX Междунар. науч.-практич. конф. «СИЭТ-2008». — Украина, г. Одесса. — 2008. — Т. 2. — С. 187. [Gorban' A. N., Kravchina V. V., Kostenko V. V., Kravchina A. V. // Tr. IX konf. «SIET-2008». Ukraine, Odessa. 2008. Vol. 2. P. 187]
2. А.с. 1261524 СССР. Способ изготовления кремниевых структур с диэлектрической изоляцией / В. А. Липко, Н. В. Макаренко, А. П. Трешун и др. — 1990. — Бюл. № 15. [А.с. 1261524 СССР. / V. A. Lipko, N. V. Makarenko, A. P. Treshchun i dr. 1990. Bull. N 15]
3. Патент на полезную модель 27068. Способ изготовления кремниевых структур с комбинированной диэлектрической изоляцией комплементарных транзисторов / В. О. Костенко, В. В. Кравчина, Д. М. Гомольский. — 2007. — Бюл. № 16. [Patent na poleznuyu model' 27068 Ukraine. / V. O. Kostenko, V. V. Kravchina, D. M. Gomol'skii. 2007. Bull. N 16]
4. Декларационный пат. 29594А Украины. Способ изготовления интегральных микросхем с комплементарными транзисторами / А. Н. Горбань, В. В. Кравчина, В. О. Костенко. — 2004. — Бюл. № 8. [Deklaratsionnyi pat. 29594A Ukraine. / A. N. Gorban', V. V. Kravchina, V. O. Kostenko. 2004. Bull. N 8]
5. Евсеев Ю. А., Дерменжи П. Г. Силовые полупроводниковые приборы. — М.: Энергоиздат, 1981. [Evseev Yu. A., Dermenzhi P. G. Moscow. Energoizdat. 1981]
6. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем. — Moscow. Мир. 1989. [Maller R., Keimins T. M.: Mir, 1989]

К. т. н. Ю. Г. ДОБРОВОЛЬСКИЙ, д. т. н. А. А. АЩЕУЛОВ

Украина, г. Черновцы, НПФ «Тензор»  
E-mail: yuriydr@gmail.com

Дата поступления в редакцию  
21.02.2011 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН  
(ЦКБ «Ритм», г. Черновцы)

## КРЕМНИЕВЫЙ $p-i-n$ -ФОТОДИОД С МАЛЫМ ТЕМНОВЫМ ТОКОМ

*Кольцевая металлизация обратной стороны кристалла  $p-i-n$ -фотодиода на основе высокоомного кремния позволяет уменьшить темновой ток на порядок, при этом потери токовой монохроматической чувствительности на длине волны 1,06 мкм не превышают 15%.*

Характеристики фотодиода, как известно, определяются применяемым материалом и конфигурацией электрических полей, подвижностью носителей заряда, шириной области пространственного заряда. Кроме того, они также определяются величиной внешнего приложенного напряжения и длиной волны принимаемого оптического излучения. Если оно поглощается только в области пространственного заряда (ОПЗ) и на пренебрежительно малых расстояниях вокруг нее, частотные характеристики  $p-i-n$ -фотодиода определяются, в основном, временем пролета генерированных носителей заряда через эту область [1–3].

При разработке кремниевых фотодиодов необходимо также обеспечивать их максимальную чувствительность при минимизации уровня шума прибора, т. е. высокий уровень пороговой чувствительности, который во многом определяется темновым током фотодиода.

Известно несколько решений этой задачи, в частности использование исходного полупроводникового материала с максимально высоким начальным временем жизни неосновных носителей заряда, оптимизация конструкции прибора и технологии его изготовления [2, 4, 5], а также применение охлаждающих устройств [6, 7].

Целью настоящей работы являлось исследование влияния формы металлизации обратной стороны кристалла  $p-i-n$ -фотодиода на основе высокоомного кремния  $p$ -типа проводимости на его темновой ток и токовую монохроматическую чувствительность к излучению с длиной волны около 1 мкм.

Рассмотрим  $p-i-n$ -фотодиод на основе высокоомного кремния  $p$ -типа проводимости, удельное сопротивление которого составляет 10–20 кОм·см. Одним из основных параметров такого фотодиода является его чувствительность, в частности монохроматическая.

Как уже отмечалось, поглощение оптического излучения в  $p-i-n$ -фотодиоде происходит в области пространственного заряда  $W_i$ , а также на пренебрежительно малых расстояниях вокруг нее (рис. 1). Эта область определяется внешним, приложенным к  $p-n$ -переходу, напряжением (с помощью контактов 1, 2 и 4, сформированных в окнах пленки оксида кремния 3) и длиной волны оптического излучения. При подаче на такой фотодиод обратного смещения 100–300 В постоянного тока область объемного заряда в кристалле фотодиода может быть растянута на всю толщину его области собственной проводимости ( $i$ -области), практически равную толщине кристалла фотодиода  $H$ . Это обеспечивает эффективный сбор фотогенерированных носителей заряда. На рис. 1 схематически показано охранный слой 5 фотодиода, задача которого состоит в том, чтобы препятствовать носителям заряда, генерированным на периферии кристалла, достигать  $p-n$ -перехода и увеличивать темновой ток.

Длина волны  $\lambda$  излучения твердотельного лазера на основе алюмоиттриевого граната с примесью неодима ( $\lambda=1,06$  мкм), который широко используется в оптоэлектронике, является одной из рабочих для кремниевых  $p-i-n$ -фотодиодов. Электрооптические

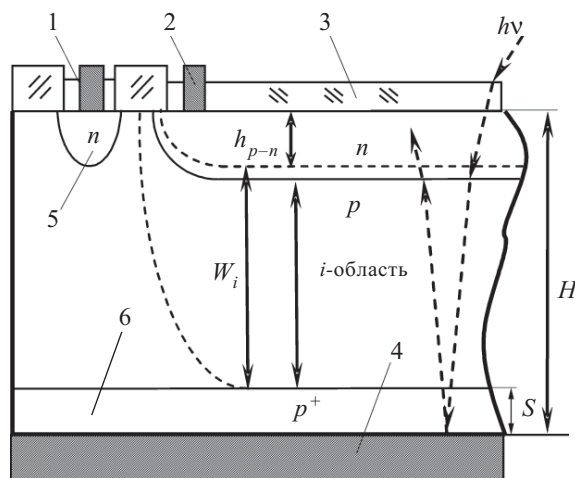


Рис. 1. Схематическое изображение разреза части кристалла  $p-i-n$ -фотодиода:

1 — контакт к охранным кольцам; 2 — контакт к фоточувствительному элементу; 3 — оксид кремния; 4 — контакт с тыльной стороной кристалла; 5 — охранный слой; 6 — геттеризирующий слой



свойства кремния таковы, что девяносто процентов такого излучения поглощается в нем на глубине около 1 мкм [1]. Кремниевые  $p-i-n$ -фотодиоды, предназначенные для работы на длине волны 1,06 мкм, как и все другие, имеют металлический омический контакт со стороны кристалла, противоположной фоточувствительному элементу, причем контакт наносится на всю обратную сторону кристалла. Он выполняет роль зеркала, отражающего значительную часть рабочего излучения, не поглощенного объемом кристалла фотодиода и дошедшего до омического контакта с обратной стороны (на рис. 1 путь рабочего излучения в объеме кристалла фотодиода обозначен  $h\nu$ ). Толщина кристалла фотодиода с учетом этого фактора выбирается от 400 до 500 мкм. Использование отражения оптического излучения контактом с обратной стороны позволяет обеспечить двойное прохождение оптического излучения через объем кристалла фотодиода и увеличить таким образом количество фотогенерированных носителей заряда. При этом чувствительность фотодиода на длине волны 1,06 мкм возрастает. В случае когда металлический контакт с обратной стороны кристалла не сплошной, а имеет отверстие (соизмеримое с размерами фоточувствительного элемента фотодиода), двойное прохождение оптического излучения отсутствует и чувствительность фотодиода уменьшается.

В [8] экспериментально показано, что отсутствие отражения от обратной стороны кристалла фотодиода ведет к уменьшению чувствительности от максимально возможной примерно в полтора раза, что соответствует случаю, когда для улучшения адгезии золотого контакта с кремнием применяется подслоя хрома. Если же толщина подслоя хрома стремится к нулю, то чувствительность фотодиода, не имеющего сплошного зеркального металлического контакта с тыльной стороны, в два раза меньше чувствительности фотодиода с таким контактом.

Вторым параметром, определяющим характеристики фотодиода, является темновой ток, который должен быть минимальным. Большая величина обратного рабочего напряжения (до 300 В)  $p-i-n$ -фотодиода приводит к разогреву кристалла фотодиода, что ухудшает его пороговые характеристики.

Одним из методов уменьшения темнового тока  $p-i-n$ -фотодиода является геттерирование обратной стороны кристалла, которое способствует связыванию части свободных потенциальных носителей заряда в этой области фотодиода. Например, введение атомов бора в обратную сторону кристалла фотодиода приводит к уменьшению подвижности неосновных носителей заряда и, в то же время, к закреплению концов дислокаций на этой границе [9, 10]. Движение дислокаций в кремниевом кристалле при дальнейших высокотемпературных операциях происходит при следующих граничных условиях. С одной стороны край дислокации «свободен», с другой — закреплён примесью бора. Движение «свободного» края дислокации происходит до тех пор, пока он также не будет зафиксирован этой примесью. В [11] показано, что примеси позволяют фиксировать дислокации так, что они располагаются дугообразно, а по-

скольку примеси бора вводятся в обратную сторону кристалла, концы дислокаций связываются именно на этой стороне кристалла. При этом сила, удерживающая закреплённый конец дислокации, пропорциональна напряжению, которое определяется концентрацией примесей.

В диапазоне температуры 1220—1320 К [12] активно проявляют себя неконтролируемые примеси, количество которых у обратной стороны кристалла кремния резко увеличивается. Эти примеси находятся на расстоянии 3—5 мкм от геттерирующего слоя. Эффективность геттерирования увеличивается с приближением слоя к активной области полупроводникового прибора (области пространственного заряда). Кроме того, остаточная концентрация неконтролируемых примесей в кристалле после проведения процесса геттерирования уменьшается пропорционально их исходной концентрации в полупроводниковой пластине.

Граница раздела «кремний — оксид кремния» также может стать источником формирования генерационных центров, если толщина слоя оксида кремния больше 0,3 мкм. Таким же источником генерационных центров может стать граница раздела «металл — кремний» на обратной стороне кремниевого кристалла. В общем случае слой  $p^+$ -типа у  $p-i-n$ -фотодиодов, с одной стороны, выполняет роль геттера, а с другой — уменьшает сопротивление перехода «металлический контакт — полупроводник». Слой металла на поверхности полупроводника образуется при конденсации испаряющегося металла. Температура кремния, на который осаждается металл (в частности, золото), составляет 500 К. Поскольку коэффициенты термического расширения этих двух материалов различны, после охлаждения на границе раздела появляются механические напряжения, которые могут стать источниками генерационных центров.

Очевидно, уменьшить величину механического напряжения на границе «кремний — металл» можно путем удаления части металлической пленки на обратной стороне кристалла фотодиода. При этом общая площадь контакта должна обеспечивать электрические свойства кристалла фотодиода не хуже, чем при сплошном контакте.

Для реализации такого предложения были изготовлены приборы по технологии, описанной в [13]. Металлический контакт на обратной стороне кристалла был выполнен в виде кольца толщиной 0,5 мкм, внутренний диаметр которого больше проекции охранного кольца (вставка на рис. 2). На этих структурах исследовались вольт-амперные характеристики фотодиодов четырех модификаций.

Результаты исследований, приведенные на рис. 2, показали, что значения удельного темнового тока фотодиодов со слоем  $p^+$ -типа толщиной 6—9 мкм практически не зависят от формы металлизации. Если же толщина  $S$  слоя  $p^+$ -типа (см. рис. 1) составляет 1—2 мкм (что обеспечивается серийной технологией), величина удельного темнового тока существенно уменьшается (примерно в 5 раз) и определяется формой металлического контакта на обратной стороне кристалла. Меньшие значения удельного

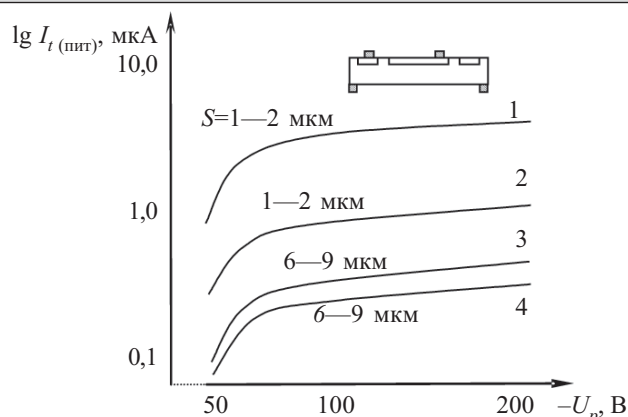


Рис. 2. Усредненные вольт-амперные характеристики  $p-i-n$ -фотодиодов с различной толщиной  $p^+$ -слоя и различной формой металлического контакта на обратной стороне кристалла:

1, 3 — сплошная; 2, 4 — кольцевая

тока имеют фотодиоды с кольцевой металлизацией. В частности, при обратном напряжении 120 В темновой ток модернизированного кристалла составляет около 0,7 мкА, в то время как у серийного прибора 5—7 мкА.

Малая зависимость удельного темнового тока фотодиода от формы металлизации его обратной стороны при толщине слоя  $p^+$ -типа 6—9 мкм можно объяснить тем, что при такой толщине слоя геттерируются не только дислокации, но и неконтролируемые примеси. Более тонкий геттерирующий слой (1—2 мкм), очевидно, не способен создать достаточную напряженность электрического поля, позволяющую удерживать примеси металлов.

Однако, как было показано в [8], токовая монохроматическая чувствительность фотодиодов, предназначенных для регистрации излучения с длиной волны 1,06 мкм, при отсутствии сплошной металлизации обратной стороны кристалла может уменьшиться примерно в полтора раза.

Для решения этой проблемы было предложено с обратной стороны кристалла  $p-i-n$ -фотодиода разместить металлизированную золотом ситалловую пластину толщиной 0,2—0,4 мкм, которая применяется для монтажа фотодиодных структур в фотоприемное устройство.

Из промежутка между оксидом кремния и слоем золота, нанесенного на ситалловую подложку, откачивается воздух (через специальное отверстие в слое металлизации) в процессе вакуумирования фотодиода при сборке его в корпус. В результате коэффициенты преломления и отражения оптического излучения в системе «оксид кремния — вакуум — золото» будут мало отличаться от аналогичных коэффициентов в обычной ситуации, когда излучение отражается от золотой металлизации на обратной стороне кристалла. При этом не учитывается, что подслоя хрома на границе «металл — кремний», используемый для повышения адгезионных свойства контакта, частично поглощает оптическое излучение.

Схематическое изображение конструкции разработанного кремниевого кристалла  $p-i-n$ -фотодиода и ход лучей падающего потока оптического излуче-

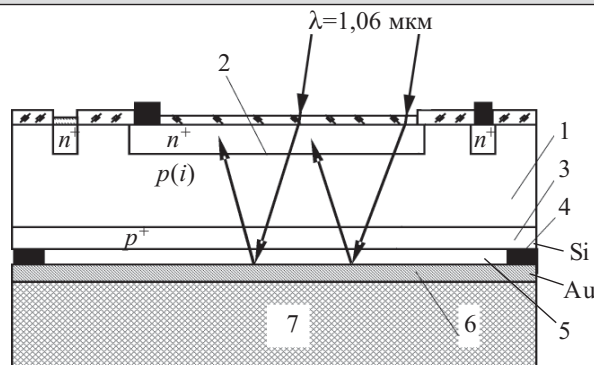


Рис. 3. Ход лучей падающего потока оптического излучения в объеме кристалла разработанного  $p-i-n$ -фотодиода: 1 — кристалл фотодиода; 2 —  $p-n$ -переход; 3 — слой  $p^+$ -типа проводимости; 4 — кольцевая металлизация тыльной стороны кристалла; 5 — вакуумированное пространство; 6 — золотая металлизация; 7 — ситалловая пластина

ния ( $\lambda=1,06$  мкм) в его объеме приведены на рис. 3. Здесь видно, что оптическое излучение, проходя через кристалл фотодиода, отражается от металлизированной ситалловой подложки.

Для исследования предложенной конструкции были изготовлены макетные образцы трех типов фотодиодов на основе кремния  $p$ -типа БДМ-И1 с удельным сопротивлением  $\rho \approx 4 \cdot 10^4$  Ом·см (ТУ 48-4-363-88. Кремний монокристаллический для фотоприемников) по технологии, приведенной в [13]. Фотодиоды изготавливались партиями по 5 штук с площадью фоточувствительного элемента 38 мм<sup>2</sup> (аналогично серийным кремниевым  $p-i-n$ -фотодиодам ФДК-142-01 [14]). Минимальность партии определялась высокой стоимостью исходного кремния.

Фотодиоды I типа — со сплошным слоем металлизации с тыльной стороны кристалла, II типа — с кольцевой металлизацией с тыльной стороны, III типа — фотодиоды предложенной конструкции (с кольцевой

Таблица 1  
Токовая монохроматическая чувствительность  $S_{\lambda}$  кристаллов  $p-i-n$ -фотодиодов трех типов

$S_{\lambda}, \text{А/Вт}$		
I тип	II тип	III тип
0,30	0,12	0,29
0,31	0,13	0,28
0,32	0,13	0,26
0,28	0,11	0,30
0,29	0,13	0,29

Таблица 2  
Темновой ток  $I_t$   $p-i-n$ -фотодиодов трех типов

Темновой ток, мкА		
I тип	II тип	III тип
3,0	0,11	0,25
3,7	0,12	0,31
3,8	0,21	0,18
4,3	0,15	0,28
3,5	0,21	0,32

металлизацией тыльной стороны и позолоченной си-  
талловой арматурой). На изготовленных фотодиодах  
измерялись темновые токи при напряжении смеще-  
ния 120 В и токовая монохроматическая чувстви-  
тельность к излучению с длиной волны 1,06 мкм при 20°С  
по методикам [15]. При этом фотодиоды облучали  
импульсным излучением.

В табл. 1 и 2 приведены измеренные значения па-  
раметров исследованных  $p-i-n$ -фотодиодов, откуда  
видно, что третий тип конструкции фотодиодов обес-  
печивает величину чувствительности, близкую к чув-  
ствительности стандартного фотодиода, изготовленного  
по стандартной технологии, со сплошной металли-  
зацией обратной стороны кристалла (I тип). Среднее  
расхождение составляет 10—15%. При этом обратные  
токи предложенного фотодиода существенно меньше  
(не менее чем на порядок), чем у стандартных.

Результаты исследования некоторых характеристик  
изготовленных кремниевых  $p-i-n$ -фотодиодов пред-  
ставлены на рис. 4—6. Измерения проводились на  
основе методик [14].

Анализ данных рис. 4 показывает, что изменение  
темнового тока относительно его значения при 20°С  
в диапазоне температуры от –60 до +80°С в логари-  
фмическом масштабе практически линейно, что соот-  
ветствует классическим представлениям [1] и ука-  
зывает на тот факт, что при изготовлении кристалла  
фотодиода не была нарушена технология. В целом,  
относительная температурная зависимость предлага-  
емого фотодиода соответствует аналогичной зависи-  
мости серийного фотодиода ФДК-142-01 [15]. При  
этом реальные значения темнового тока у предлагае-  
мого фотодиода составляют около 1 мкА.

Емкостная характеристика предлагаемых  $p-i-n$ -  
фотодиодов определяется, в основном, областью  
объемного заряда, которая, в свою очередь, зависит  
от удельного сопротивления материала (кремния) и  
рабочего напряжения. Поскольку оба фотодиода — и  
ФДК-142-01, и предлагаемый, изготовлены из одно-  
го и того же материала (кремния  $p$ -типа проводимо-  
сти марки БДМ-И1), их емкостные характеристики  
(рис. 5) практически идентичны. Однако при высо-  
ком напряжении (выше 90 В) наблюдаются несколь-  
ко меньшие значения емкости у предлагаемого фото-

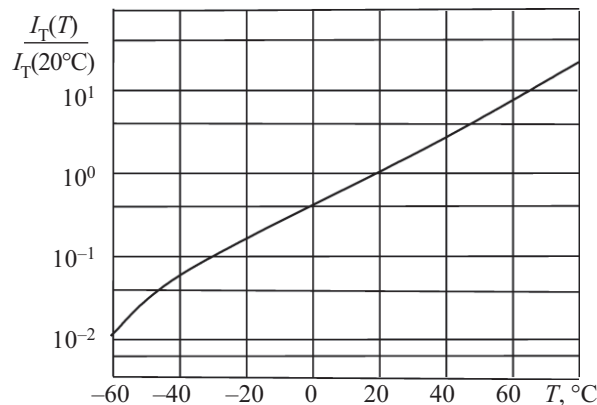


Рис. 4. Усредненная относительная температурная ха-  
рактеристика темнового тока кристаллов кремниевых  $p-i-n$ -  
фотодиода III типа

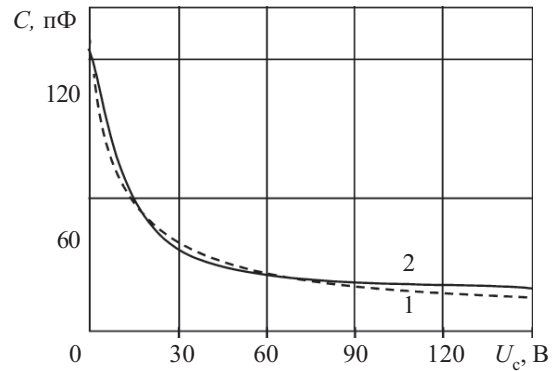


Рис. 5. Усредненные вольт-фарадные характеристики кри-  
сталлов серийного фотодиода ФДК-142-01 (1) и предлага-  
емого фотодиода (2), измеренные при 20°С

диода. Это можно объяснить тем, что в области, ли-  
шенной металлизации с тыльной стороны его кри-  
сталла, количество дефектов меньше, чем у серийно-  
го фотодиода, у которого металлизация сплошная,  
поскольку она является источником механических  
напряжений и, соответственно, дефектов, увеличи-  
вающих удельное сопротивление кремния в этой об-  
ласти. Это подтверждается тем, что емкость увеличи-  
вается при таком напряжении, при котором область  
объемного заряда достигает тыльной стороны кри-  
сталла фотодиода.

Результаты исследования относительных частот-  
ных характеристик серийного и предлагаемого фо-  
тодиодов (рис. 6) показывают, что частичное отсут-  
ствие металлизации с обратной стороны кристалла  
предлагаемого фотодиода влияет на его частотную  
характеристику. Спад переходной характеристики у  
нового прибора начинается примерно с частоты  
 $1 \cdot 10^6$  Гц, в то время как у серийного фотодиода  
ФДК-142-01 — с  $2 \cdot 10^6$  Гц. Таким образом, как было  
показано в [3, 16, 17], сказывается увеличение по-  
следовательного сопротивления кристалла фотоди-  
ода за счет отсутствия сплошной металлизации его  
обратной стороны. Частотная характеристика пред-  
лагаемого фотодиода несколько хуже, чем у серийного,  
что, тем не менее, не ограничивает его возможности  
при обработке высокочастотных оптических сигналов.

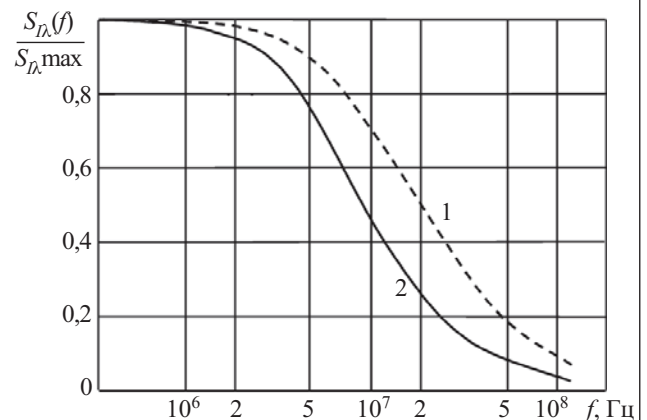


Рис. 6. Частотные характеристики токовой монохроматической чувствительности кристалла серийного фотодиода  
ФДК-142-01 (1) и предлагаемого фотодиода (2)



\*\*\*

Таким образом, проведенные исследования показывают, что предложенная конструкция  $p-i-n$ -фотодиода на основе высокоомного кремния  $p$ -типа проводимости обеспечивает минимальные потери токовой монохроматической чувствительности на длине волны 1,06 мкм (не более 15%) при меньших (примерно на порядок), по сравнению с серийными фотодиодами, значениях темнового тока.

Такой фотодиод может быть рекомендован в качестве базовой конструкции для разработки серийных изделий.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 2.— М.: Мир, 1984. [Zi S. M.: Mir, 1984]
2. Добровольский Ю. Г., Ащеулов А. А. Особливості конструкції та технології кремнієвих  $p-i-n$ -фотодіодів // Фізика і хімія твердого тіла.— 2001.— Т. 2, № 3.— С. 441—447. [Dobrovols'kii Yu. G., Ashcheulov A. A. // Fizika i khimiya tverdogo tila. 2001. Vol. 2, N 3. P. 441]
3. Dobrovolskiy Yu. G., Danilyuk A. I. Estimation of photodiode frequency characteristics determined by motion of charge carriers in the space charge region. The case of even generation of carriers // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics.— 2009.— Vol. 12, N 1.— P. 77—82.
4. Астахов В. П., Гиндин Д. А., Карпов В. В., Сорокин К. В. О влиянии сопротивления поверхностного канала на темновой ток квадрантных  $p-i-n$ -фотодиодов на кремнии // Прикладная физика.— 1999.— № 2.— С. 79—85. [Astakhov V. P., Gindin D. A., Karpov V. V., Sorokin K. V. // Prikladnaya fizika. 1999. N 2. P. 79]
5. Декларацийний патент України на винахід № 66666 А. Фотодіод // С. Ю. Башкіров, В. М. Годованюк, Ю. Г. Добровольський та ін.— 2004.— Бюл. № 5. [Deklaratsiiniy patent Ukraini na vinakhid N 66666 A. // S. Yu. Bashkirov, V. M. Godovanyuk, Yu. G. Dobrovols'kii ta in. 2004. Bull. N 5]
6. Ащеулов А. А., Романюк И. С., Добровольский Ю. Г. и др. Охладители Пельтье повышенной надежности для фотоприемников // Прикладная физика.— 2003.— Вып. 2.— С. 114—117. [Ashcheulov A. A., Romanuk I. S., Dobrovols'kii Yu. G. i dr. // Prikladnaya fizika. 2003. Vyp. 2. P. 114]

7. Вайнер А. Л. Каскадные термоэлектрические источники холода.— М.: Сов. Радио, 1976. [Vainer A. L. Moscow. Sov. Radio, 1976]
8. Добровольский Ю. Г., Комаров Е. В., Биксей М. П. Двухспектральный фотоприемник // Технологии и конструирование в электронной аппаратуре.— 2005.— № 3.— С. 18—22. [Dobrovols'kii Yu. G., Komarov E. V., Biksei M. P. // Tekhnologii i konstruirovaniye v elektronnoi apparature. 2005. N 3. P. 18]
9. Освенкий В. Б., Шифрин С. С. Закономерности размножения дислокаций в совершенных кристаллах полупроводников // В кн.: Динамика дислокаций.— Киев: Наукова думка, 1975.— С. 328—368. [Osvenkii V. B., Shifrin S. S. // V kn.: Dinamika dislokatsii. Kiev: Naukova dumka, 1975. P. 328]
10. Ащеулов А. А., Добровольский Ю. Г., Годованюк В. М. та ін. Технологічний метод зменшення темнового струму кремнієвих  $p-i-n$ -фотодіодів // Науковий вісник Чернівецького університету.— 1998.— Вип. 32.— С. 135—142. [Ashcheulov A. A., Dobrovols'kii Yu. G., Godovanyuk V. M. ta in. // Naukovii visnik Chernivets'kogo universitetu. 1998. Iss. 32. P. 135]
11. Косевич Н. А. Физическая механика реальных кристаллов.— Киев: Наукова думка, 1981. [Kosevich N. A. Kiev: Naukova dumka, 1981]
12. Meek R. L., Seidl Tt. E., Gullis A. G. Diffusion gettering of Au and Cu in silicon // Journal of the Electrochemical Society.— 1975.— Vol. 122, N 6.— P. 784—786.
13. Ascheulov A. A., Godovanyuk V. M., Dobrovolsky Yu. G. et al. Silicon  $p-i-n$ -photodiode with little value dark proceed // Proceedings of SPIE.— 1999.— Vol. 3890.— P. 119—124.
14. Паспортные данные на фотодиоды [электронный ресурс]. ОАО «Кварц»: — Режим доступа: <http://www.quartz.cv.ua/products/index.html> [Pasportnye dannye na fotodiody [elektronnyi resurs]. ОАО «Kvarts»: — Rezhim dostupa: <http://www.quartz.cv.ua/products/index.html>]
15. ГОСТ 17772-88. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определение характеристик. [ГОСТ 1777288.]
16. Dobrovolskiy Yu. G., Danilyuk A. I. Estimation of the frequency descriptions of photodiode, determined by motion of transmitters of charge in area of spatial charge // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics.— 2006.— Vol. 9, N 3.— P. 40—43.
17. Danilyuk A. I., Dobrovolskiy Yu. G. Estimation of the frequency descriptions of a photodiode, determined by the motion of charge carriers in the space charge region on the surface generation of carriers // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics.— 2007.— Vol. 10, N 3.— P. 91—94.

#### НОВЫЕ КНИГИ

**Редькин П. Микроконтроллеры Atmel архитектуры AVR32 семейства AT32UC3 (+ DVD-ROM).— М.: Техносфера, 2010 г.— 784 с.**

Предлагаемая книга является законченным справочным пособием и руководством по применению 32-разрядных микроконтроллеров архитектуры AVR32 фирмы Atmel семейства AT32UC3.

Книга содержит подробную справочную информацию о большинстве выпускаемых в настоящее время устройств этого семейства. Помимо сведений справочного характера книга включает обширную информацию по программным инструментальным средствам разработки приложений для AT32UC3: IDE IAR Embedded Workbench for AVR32 от IAR, IDE AVR32Studio от Atmel и аппаратным инструментальным средствам от Atmel. В книге также приводятся описания свободно распространяемых производителем примеров приложений для AT32UC3, протестированных автором. Изложенная в книге информация охватывает все этапы проектирования приложений на основе AT32UC3, что позволяет в короткие сроки овладеть навыками работы с этими микроконтроллерами даже начинающим разработчикам. К книге прилагается DVD-диск, содержащий бесплатные демоверсии описанного в ней инструментального программного обеспечения, исходные коды описанных проектов, оригинальную справочную информацию производителя и другие информационные и справочные материалы. Книга предназначена для специалистов в области разработки электронной аппаратуры, студентов технических вузов и других лиц, интересующихся электроникой. Необходимый уровень подготовки читателей предполагает знание основ цифровой и аналоговой схемотехники, а также основ программирования на языке C.



К. т. н. А. И. РУДЕНКО, к. т. н. В. Ю. КРАВЕЦ,  
к. т. н. В. К. ЗАРИПОВ

Украина, НТУУ «Киевский политехнический институт»  
E-mail: kravetz\_kpi@ukr.net

Дата поступления в редакцию  
23.07 2010 г.

Оппонент д. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО  
(МПП Украины, г. Киев)

## ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИАТОРА ДЛЯ ЭФФЕКТИВНЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

*Приведены результаты исследования теплопередающих характеристик радиатора на основе тепловой трубы для охлаждения элементов персональных компьютеров.*

Развитие современной радиоэлектронной аппаратуры, в том числе вычислительной техники и информационно-измерительных систем, неразрывно связано с постоянным стремлением разработчиков максимально снизить их габариты и массу при одновременном увеличении удельной тепловой мощности, выделяемой элементной базой. Поэтому разработка и создание новых компактных высокоэффективных систем охлаждения, позволяющих обеспечивать оптимальные тепловые режимы приборов, узлов, блоков и других теплонапряженных элементов, представляет собой актуальную задачу.

Опыт длительной эксплуатации устройств показывает, что допустимая рабочая температура большинства тепловыделяющих элементов, в частности полупроводниковых приборов, в которых реализуется  $p-n$ -переход, при тепловых потоках 60 Вт и выше не должна превышать 80°C. По этой причине большинство известных способов охлаждения [1], при которых отвод теплоты от «горячего элемента» к охлаждающей среде осуществляется только за счет теплопроводности (компаунды) или конвективного теплообмена (радиаторы воздушного охлаждения), становятся неэффективными. Способ жидкостного охлаждения, позволяющий существенно интенсифицировать теплообмен по сравнению с указанными методами применяется, в основном, при охлаждении крупных элементов (электроды мощных ламп, трансформаторы и др.) и требует усложнения конструкции аппаратуры, а также наличия вспомогательных устройств (насос, емкость для жидкости, теплообменник и пр.).

Как следует из анализа работ [1, 2], наиболее перспективными путями улучшения теплопередающих характеристик при плотностях теплового потока  $q \geq 1 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> являются жидкостное, а также естественное или принудительное испарительное охлаждение, при которых отвод теплоты происходит непосредственно с поверхности теплонапряженных объектов. Однако на практике эти методы применяются редко ввиду существенного усложнения конструкции

системы охлаждения и снижения надежности ее работы. В таких случаях, по нашему мнению, теплоту более целесообразно отводить через стенку минимальной толщины с высоким коэффициентом теплопроводности, что позволит упростить технологию изготовления и эксплуатацию охлаждающих устройств.

В последнее время в системах охлаждения современной техники все чаще используются тепловые трубы (ТТ), позволяющие эффективно отводить теплоту за счет фазового перехода теплоносителя (испарение – конденсация) [3, 4]. Являясь автономными устройствами, работающими по замкнутому испарительно-конденсационному циклу, ТТ позволяют осуществлять передачу и трансформацию больших тепловых потоков с минимальным термическим сопротивлением без дополнительных энергетических затрат на транспорт теплоносителя при одновременном снижении массогабаритных характеристик системы охлаждения [5, 6].

Целью настоящей работы является исследование радиатора на основе ТТ для системы охлаждения центрального процессора (например, AMD Athlon) мощных персональных компьютеров.

### Конструкция радиатора и методика исследований

Одним из вопросов, возникающим при создании систем охлаждения на основе ТТ, является выбор конструкционного материала и теплоносителя исходя из следующих требований: а) конструкционный материал корпуса и капиллярной структуры, находясь в контакте с теплоносителем в условиях воздействия повышенной температуры, не должен подвергаться коррозионному разрушению при длительном функционировании системы охлаждения; б) теплоноситель и конструкционный материал должны обладать теплофизическими свойствами, обеспечивающими наиболее эффективную передачу теплоты от «горячего» элемента и ее отвод в окружающую среду.

С учетом этих требований конструкционным материалом для радиаторов была выбрана медь марки М1, а в качестве теплоносителей применялись дистиллированная вода (радиатор 1), ацетон (радиатор 2) и этиловый спирт (радиатор 3). На рис. 1 показан общий вид разработанной [7] и исследованной конструкции радиаторов.

Капиллярно-пористая структура толщиной 0,8 мм и пористостью 90% располагалась на внутренней по-

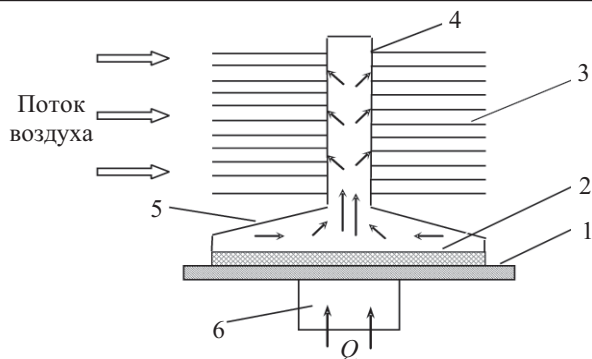


Рис. 1. Конструкция радиатора на основе на основе ТТ: 1 — основание; 2 — капиллярно-пористая структура; 3 — оребрение; 4 — зона конденсации; 5 — переходный участок; 6 — тепло-выделяющий элемент

верхности оснований радиаторов и была изготовлена из дискретных медных волокон путем их спекания.

Основные геометрические размеры радиаторов:

— основание	49×49×3 мм;
— диаметр оребрения	45 мм;
— толщина ребра	0,5 мм;
— шаг оребрения зоны конденсации (количество ребер)	3,35 мм (11 шт.);
— наружный диаметр зоны к конденсации ТТ	12 мм;
— максимальный наружный диаметр переходного участка и толщина его стенки	45 мм, $\delta=0,5$ мм;
— общая высота	53 мм.

Исследования теплотехнических характеристик радиаторов проводились на стенде, основным элементом которого являлась аэродинамическая труба разомкнутого типа. Рабочий участок, в котором устанавливался исследуемый радиатор, имел прямоугольное сечение (50×59 мм) и присоединялся к всасывающему патрубку вентилятора с регулируемым числом оборотов. Скорость воздушного потока измерялась пневмометрической трубкой Прандтля с подключенным к ней микроманометром. Источник тепловыделения имитировался с помощью медного цилиндра диаметром 12 мм с намотанным на него нагревателем из нихрома. Мощность теплового потока измерялась ваттметром и регулировалась автотрансформатором.

Для улучшения контакта основания радиатора с источником тепловыделения применялась теплопроводная паста КПТ-8. Для уменьшения тепловых потерь в окружающую среду от всех элементов экспериментальной установки применялась вата из базальтовых волокон БСТВ -1.

Температурное поле всех элементов радиаторов по их высоте измеряли медь-константановыми термопарами, установленными на их поверхностях. Исследования проводились при стационарном режиме, который фиксировался по установившимся показаниям всех термопар. Диапазон изменения скорости воздушного потока  $w_{\text{возд}}$  при проведении опытов составлял 2,73...6,17 м/с.

В экспериментах также определяли температуру в зоне контакта теплонапряженного элемента с основанием радиатора, а также средние значения температу-

ры зон нагрева и конденсации. Плотность теплового потока в зоне нагрева радиаторов определялась как

$$q_n = Q/F_n,$$

где  $Q$  — мощность подведенного теплового потока;

$F_n$  — площадь зоны нагрева с капиллярно-пористой структурой при диаметре зоны нагрева 44 мм.

По полученным результатам рассчитывались соответствующие теплотехнические характеристики.

### Результаты исследования

Анализ полученных данных показал, что при увеличении тепловой нагрузки в пределах исследованного диапазона наблюдается постепенное увеличение температуры оснований всех трех радиаторов. Однако, как видно из рис. 2, при  $q_n \leq 1 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> применение этилового спирта и ацетона предпочтительнее, чем дистиллированной воды. Это можно объяснить тем, что необходимый для начала кипения жидкости перепад между температурой зоны нагрева ТТ (основание радиатора с нанесенной на нее капиллярно-пористой структурой) и температурой насыщения (при соответствующем давлении) у ацетона и этилового спирта меньше, чем у воды [3]. То есть процесс кипения, сопровождающийся более интенсивным отводом теплоты от охлаждаемого объекта и, соответственно, уменьшением температуры теплоподводящей поверхности  $t_{\text{осн}}$  в радиаторах 2 и 3 начинается при более низких плотностях теплового потока. С повышением тепловой нагрузки в радиаторе 1, заправленном водой, также начинается процесс кипения, характеризующийся более высокой интенсивностью теплообмена по сравнению с этанолом и ацетоном, теплофизические свойства которых уступают воде в данных условиях. Вследствие этого наблюдается снижение температуры основания радиатора 1 по сравнению с остальными радиаторами.

С целью сравнения разработанных радиаторов с традиционными конструкциями на рис. 2 представлены данные из [8], полученные для традиционной системы охлаждения с плоской теплообменной поверхностью с прямоугольными пластинчатыми ребрами при скорости обдува 3,5 м/с. Здесь видно, что температура основания всех радиаторов на основе ТТ при тех же плотностях теплового потока и практически равных условиях охлаждения значительно ниже, чем у радиатора с пластинчатым оребрением.

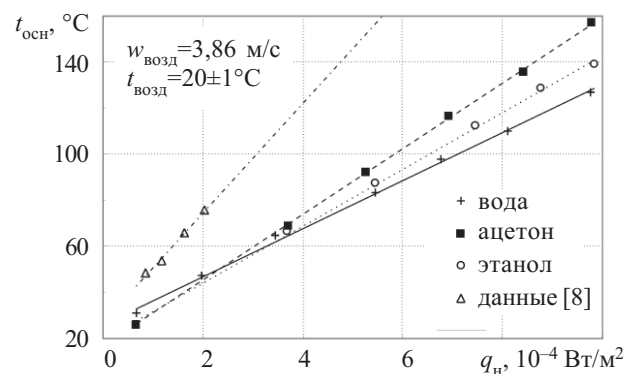


Рис. 2. Зависимость температуры основания радиатора от плотности теплового потока



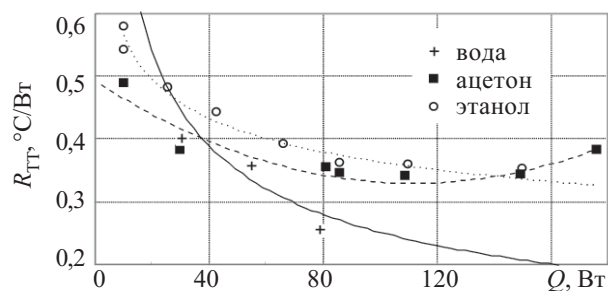


Рис. 3. Зависимость термического сопротивления радиаторов  $R_{TT}$  от передаваемого теплового потока  $Q$  при  $w_{\text{возд}} = 2,73$  м/с

На рис. 3 представлены данные об изменении термического сопротивления — одной из основных теплотехнических характеристик радиаторов на основе ТТ, которое определялось как

$$R_{TT} = \frac{\bar{t}_n - \bar{t}_k}{Q};$$

$$\bar{t}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i, \quad \bar{t}_k = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m t_j,$$

где  $\bar{t}_i$  — средняя температура в зоне нагрева, определяемая по показаниям  $n$  термопар ( $n = 4$ ), установленных в канавках глубиной 1 мм в основаниях радиаторов;

$\bar{t}_k$  — средняя температура зоны конденсации, определяемая по показаниям  $m$  термопар ( $m = 12$ ), расположенных в трех сечениях по высоте ребренной части радиаторов (ребра, основания ребер), а также на переходном участке.

Анализ полученных результатов показывает, что величина термического сопротивления  $R_{TT}$  снижается с повышением мощности теплового потока  $Q$  (из-за увеличения интенсивности процессов теплообмена в зонах нагрева и конденсации), причем характер изменения зависимости  $R_{TT} = f(Q)$  носит автоматический характер для всего исследованного диапазона изменения скорости охлаждающего воздуха. Это объясняется тем, что основной вклад в общее термическое сопротивление радиатора  $R_{\text{общ}}$  вносит термическое сопротивление теплоотдачи от охлаждаемой поверхности радиатора (ребра, их основания и переходный участок) к омываемому ее воздушному потоку. С повышением тепловой нагрузки выше 100 Вт (соответствен-

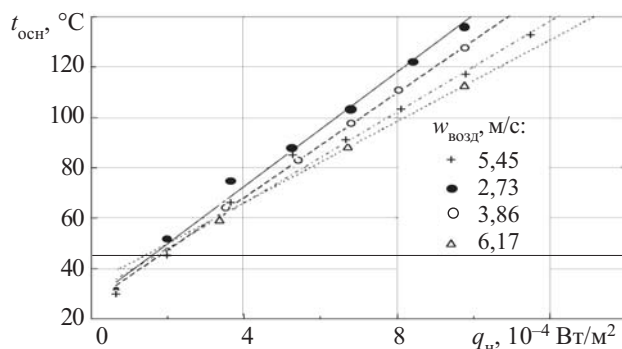


Рис. 4. Зависимость температуры основания радиатора 1 от плотности теплового потока при различной скорости потока воздуха

но  $q_n > 6,58 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>) в радиаторе, заправленном ацетоном, наблюдается увеличение термического сопротивления вследствие «запаривания» капиллярной структуры (при этом ТТ работает стабильно).

Поскольку охлаждение разработанных радиаторов осуществляется воздушным потоком, практический интерес представляют данные об изменении температуры основания радиаторов в зависимости от плотности теплового потока при различных скоростях обдува. Это позволяет выбрать вентилятор с наиболее приемлемыми габаритными и расходными характеристиками, а также в соответствии с конструктивными особенностями прибора, в котором находится теплонапряженный элемент. На рис. 4 представлены такие результаты, полученные при исследовании радиатора, заправленного дистиллированной водой. Как и следовало ожидать, увеличение скорости обдува способствует значительному снижению температуры основания радиатора, особенно при  $q_n \geq 4 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>.

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы:

- для систем охлаждения теплонапряженных элементов радиоэлектронной техники целесообразно использовать радиаторы на основе тепловой трубы, особенно в случаях когда невозможно применить жидкостное охлаждение;

- применение ацетона в качестве теплоносителя наиболее целесообразно при плотностях теплового потока  $q_n \leq 2,5 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>, этанола — при  $q_n \leq 4 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>;

- термическое сопротивление тепловых труб находится в диапазоне 0,5...0,6 °C/Вт, существенно снижаясь с увеличением передаваемого теплового потока;

- наиболее приемлемым теплоносителем для систем охлаждения на основе медных ТТ, работающих при температурах выше 80 °C является дистиллированная вода.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Роткоп Л. Л., Спокойный Ю. Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Советское радио, 1976. [Rotkop L. L., Spokoyniy Yu. E. Moscow. Sov. radio. 1976]
2. Домнич В. И., Зиньковский Ю. Ф. Конструирование РЭС. Оценка и обеспечение тепловых режимов. — К.: УМК ВО, 1990. [Domnich V. I., Zin'kovskiy Yu. F. Kiev. UMK VO. 1990]
3. Верлань А. Ф., Горошко И. О., Николаенко Ю. Е. Моделирование тепловых и гидродинамических процессов в перспективных базовых несущих конструкциях с тепловыми трубами // Промышленная теплотехника. — 2007. — Т. 29, № 4. — С. 52—58 [Verlan' A. F., Goroshko I. O., Nikolaenko Yu. E. // Promyshlennaya teplotekhnika. 2007. Vol. 29, N 4. P. 52]
4. Николаенко Ю. Е. Схемные решения организации теплоотвода от функциональных модулей ЭВМ с помощью двухфазных теплопередающих элементов и устройств // Управляющие системы и машины. — 2005. — № 2. — С. 29—36. [Nikolaenko Yu. E. // Upravlyayushchie sistemy i mashiny. 2005. N 2. P. 29]
5. Семена М. Г., Гершуни А. Н., Зарипов В. К. Тепловые трубы с металловолоконными капиллярными структурами. — К.: Вища школа, 1984. [Semena M. G., Gershuni A. N., Zaripov V. K. Kiev. Vishcha shkola, 1984]
6. Дульнев Г. Н., Беляков А. П. Тепловые трубы в электронных системах стабилизации температуры. — М.: Радио и связь, 1985. [Dul'nev G. N., Belyakov A. P. Moscow. Radio i svyaz'. 1985]
7. Патент України на корисну модель № 3942. Радиатор // Руденко О. І., Ніщик О. П., Кравець В. Ю., Паламарчук О. Я. — 2004. — Бюл. № 12. [Patent Ukraini na korisnu model' N 3942. // Rudenko O. I., Nishchik O. P., Kravets' V. Yu., Palamarchuk O. Ya. 2004. Byul. N 12]
8. Письменный Е. Н., Бурлей В. Д., Терех А. М., и др. Влияние разрежки, поворотов и отгибки ребер на тепло-аэродинамические характеристики поверхностей теплообмена // Промышленная теплотехника. — 2003. — Т. 25. — № 1. — С. 10—16. [Pis'menniy E. N., Burlei V. D., Terekh A. M., i dr. // Promyshlennaya teplotekhnika. 2003. Vol. 25. N 1. P. 10]

Д. т. н. Ю. А. ЗАГОРУЙКО, к. ф.-м. н. Н. О. КОВАЛЕНКО,  
В. А. ХРИСТЬЯН, к. ф.-м. н. О. А. ФЕДОРЕНКО,  
А. С. ГЕРАСИМЕНКО, к. ф.-м. н. М. В. ДОБРОТВОРСКАЯ,  
П. В. МАТЕЙЧЕНКО

Украина, г. Харьков, Институт монокристаллов НАНУ  
E-mail: zagoruiko@isc.kharkov.ua

Дата поступления в редакцию  
18.10.2010 г.

Оппонент д. х. н. В. Н. ТОМАШИК  
(ИФП им. В. Е. Лашкарева, г. Киев)

## ЛАЗЕРНАЯ АБЛЯЦИЯ И ФОТОСТИМУЛИРОВАННАЯ ПАССИВАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛОВ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$

*Предложен модифицированный технологический способ пассивации кристаллических образцов полупроводниковых твердых растворов  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ , применяемых для изготовления детекторных сенсоров рентгеновского и гамма-излучения.*

Механическая обработка полупроводниковых кристаллов приводит к появлению в образцах поверхностных токов утечки, что отрицательно влияет на эксплуатационные характеристики приборов, изготовленных на их основе. Для устранения токов утечки разработаны различные методы пассивации полупроводниковых кристаллов: мокрые химические методы, сухие физические методы, а также их комбинации [1–4].

Для пассивации кристаллов  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  наибольшее распространение получили химические методы, приводящие к образованию на поверхности кристалла защитных сульфидных или оксидных пленок [3]. Однако химические методы, в которых применяются различные, в том числе и токсичные, растворы (например, растворы брома в метаноле), не обеспечивают такого эффективного уменьшения поверхностной электрической проводимости образцов, как сухие физические методы пассивации [2].

Существенное снижение поверхностной электропроводности образцов  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  наблюдается при использовании таких сухих методов пассивации, как ионно-лучевое и ионно-плазменное распыление пассивирующей защитной пленки в вакуумной установке с использованием электродугового разряда, получение оксидной пленки на поверхности образца при его бомбардировке как низко-, так и высокоэнергетичными атомами кислорода и др. [1, 2, 5]. Следует отметить, что физические методы пассивации трудоемки и требуют сложной, а в ряде случаев и уникальной аппаратуры [6].

Ранее предложенные авторами способы фотостимулированной (ФСП) и фотоэлектростимулированной пассивации (ФЭСП)  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  [7, 8] обеспечивают довольно эффективное уменьшение поверхностных токов утечки за счет получения высокоомного защитного оксидного слоя на поверхности образцов. В развитие исследований [7, 8] в настоящей работе

предложен новый метод пассивации, исключаяющий применение токсичных компонентов. В этом методе снятие нарушенного слоя с боковой поверхности образцов проводят методом лазерной абляции (ЛА) при одновременной и последующей обработке образцов методом ФСП или ФЭСП.

Удаление нарушенного слоя проводили путем облучения образцов последовательностью импульсов лазерного излучения. На рис. 1 приведена блок-схема установки для лазерной абляции нарушенного слоя с боковой поверхности кристаллических образцов  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  и последующего получения на этой поверхности высокоомного защитного слоя методом фотостимулированной пассивации. Излучение YAG:Nd-лазера на основной частоте (с длиной волны  $\lambda=1064$  нм) преобразовывали в излучение на частоте второй гармоники с длиной волны  $\lambda_2=532$  нм. Использовали импульсы длительностью 10...100 нс со средней плотностью мощности  $p=10\text{--}70$  МВт/см<sup>2</sup>. Доза облучения составляла 0,25–3,0 Дж/см<sup>2</sup>.

Длительность проведения процесса лазерной абляции (0,5–5,0 мин) была установлена экспериментально. Она обусловлена размерами образца, скоростью его вращения и периодом следования лазерных импульсов. Плотность мощности, при которой происходит эффективное удаление нарушенного слоя, и доза лазерного облучения также установлены экспериментально. При дозе облучения менее 0,25 Дж/см<sup>2</sup> нарушенный слой удаляется не полностью, а увеличение дозы лазерного облучения более 3,0 Дж/см<sup>2</sup> нецелесообразно, т. к. не приводит к заметному улучшению спектрометрических и электрических характеристик получаемых детекторов.

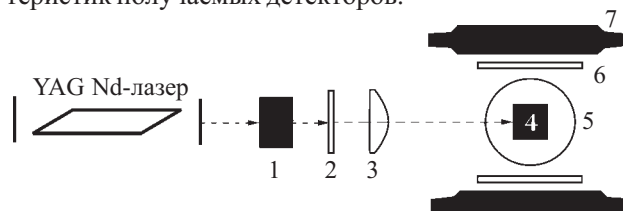


Рис. 1. Схема установки для лазерной абляции и фотостимулированной пассивации боковой поверхности образцов  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ :

1 — преобразователь излучения лазера; 2 — светофильтр; 3 — фокусирующая линза; 4 — образец; 5 — вращающийся кристаллодержатель; 6 — тепловые экраны-светофильтры; 7 — источники УФ-излучения

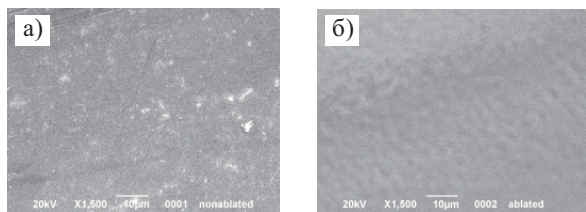


Рис. 2. Микрофотографии поверхности кристаллов  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  до (а) и после (б) лазерной абляции

Как видно из рис. 2, лазерная абляция приводит к заметной очистке обработанной поверхности кристаллического образца.

В таблице приведены значения электрического сопротивления кристаллических образцов  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  и токов утечки детекторов до и после пассивации разработанным способом (лазерная абляция при одновременной и последующей обработке образцов методом ФСП), а также способом ФСП и способом ФЭСП, проведенными после химического травления (ХТ) нарушенного слоя. Из таблицы видно, что разработанный способ позволяет существенно увеличить поверхностное электрическое сопротивление  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ -детекторов и снизить токи утечки по их боковой поверхности. Такие изменения обусловлены образованием оксидного слоя  $\text{TeO}_2$  и, вследствие этого, резким снижением (практически до нуля) концентрации свободного Те в приповерхностном слое образцов. Об этом свидетельствуют данные исследований состава поверхности образцов, проведенные методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (рис. 3).

Исследования были проведены на спектрометре XSAM-800 Kratos. Давление в камере прибора составляло примерно  $10^{-6}$  Па. Фотоэлектроны возбуждались  $\text{MgK}\alpha$ -излучением ( $h\nu = 1253,6$  эВ). Мощность рентгеновской трубки составляла 15 кВт, а электронный ток — 20 мА. Кинетическая энергия электронов анализировалась полусферическим электростатическим анализатором. Разрешение спектрометра составляло 1 эВ, точность определения энергии связи — 0,3 эВ. Послойное травление проводилось с помощью источника ионов  $\text{Ar}^+$  с энергией 1,5 кэВ. Скорость травления составляла около 5 нм/мин.

Состав поверхности образца определяется по соотношению площадей линий C1s, O1s, Te3d, Cd3d, Zn2p — основных оболочек и Zn LMM-Оже-линии с учетом значений поверхностного электрического сопротивления  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ -детекторов до ( $R_1$ ) и после ( $R_2$ ) проведения пассивации различными способами и отношение соответствующих токов утечки ( $I_1/I_2$ )

Способ обработки	$R_1$ , $10^8$ Ом	$R_2$ , $10^{10}$ Ом	$R_2/R_1$	$I_1/I_2$	$P$ , МВт/см <sup>2</sup>
ХТ+ФСП	110	16	14,5	16,8	—
ХТ+ФЭСП	55	13	23,6	24,4	—
ЛА+ФСП	30	8,1	27,0	28,6	48,3
	150	32	21,3	20,4	44,1
	4,7	3,4	72,34	71,1	57,7
	3,15	2,63	83,49	83,3	68,5
	1,45	1,3	89,65	79,2	62,3

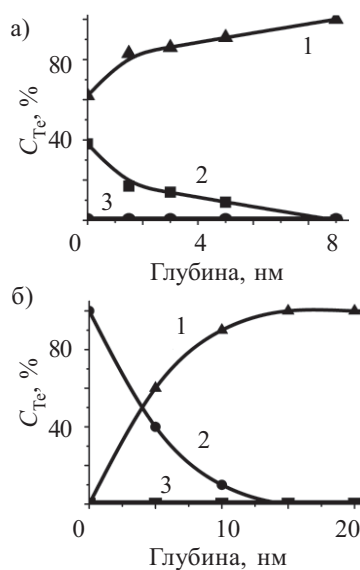


Рис. 3. Профили распределения Те между образовавшимися соединениями  $\text{TeO}_2$  (3),  $\text{CdTe}$  (1) и свободным Те (2) после обработки образца методом ЛА (а) и методом ЛА+ФСП (б)

том коэффициентов элементной чувствительности [9]. Толщина анализируемого слоя составляла около 5 нм.

\*\*\*

Таким образом, разработанный метод пассивации (ЛА+ФСП) обеспечивает получение толстых однородных и высокоомных оксидных пленок, что существенно снижает токи утечки по боковой поверхности  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ -детекторов.

Предложенный способ является воспроизводимым и позволяет исключить применение высокотоксичных химических компонентов при изготовлении спектрометрических детекторов на основе  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ .

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Pat. 6043106 USA. Method for surface passivation and protection of cadmium zinc telluride crystals / M. J. Mescher, R. B. James., T. E. Schlesinger, H. Hermon.— 28.03.2000.
2. Pat. 7001849 USA. Surface treatment and protection method for cadmium zinc telluride crystals / G. W. Wright., R. B. James, A. Burger, D. A. Chinn.— 21.02.2006.
3. Galkina O. S., Grebenyuk N. N., Dobrotvorskaya M. V. et al. Studies of methods for chemical treatment of semiconductor detectors based on  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  crystals // Functionals Materials.— 2001.— Vol. 8, N 2.— P. 392—394.
4. Кутний В. Е., Кутний Д. В., Рыбка А. В. и др. Газостатическая обработка структур  $\text{Au-CdZnTe-Au}$  для детекторов рентгеновского и гамма-излучения // Вопросы атомной науки и техники. Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники.— 2008.— Вып. 1 (17).— С. 123—128. [Kutnii V. E., Kutnii D. V., Rybka A. V. i dr. // Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Vakuuum, chistye materialy, sverkhprovodniki. 2008. Iss. 1 (17). P. 123]
5. Леонов С. А., Кутний Д. В., Наконечный Д. В. и др. Ионно-плазменная пассивация поверхности кристалла  $\text{CdZnTe}$  // Вопросы атомной науки и техники. Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники.— 2004.— Вып. 3 (85).— С. 96—100. [Leonov S. A., Kutnii D. V., Nakonechnyi D. V. i dr. // Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Vakuuum, chistye materialy, sverkhprovodniki. 2004. Iss. 3 (85). P. 96]
6. Rybka A. V., Leonov S. A., Prokhoretz I. M. et al. Influence of detector surface processing on detector performance // Nucl. Instr. & Meth. A.— 2001.— Vol. 458.— P. 248—253.
7. Пат. ПМ 40036 Украины. Способ получения спектрометрического детектора на основе соединения  $\text{CdZnTe}$  / Ю. А. Загоруйко, О. А. Федоренко, Н. О. Коваленко.— 25.03.2009. [Pat. PM 40036 of Ukraine. / Yu. A. Zagoruiko, O. A. Fedorenko, N. O. Kovalenko. 25.03.2009]
8. Пат. ПМ 48252 Украины. Способ получения спектрометрического детектора на основе соединения  $\text{CdZnTe}$  / Ю. А. Загоруйко, В. А. Христьян, О. А. Федоренко.— 10.03.2010. [Pat. PM 48252 of Ukraine. / Yu. A. Zagoruiko, V. A. Khrist'yan, O. A. Fedorenko. 10.03.2010]
9. Анализ поверхности методами Оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / Под ред. Д. Бриггса и М. П. Сиха.— М.: Мир, 1987. [Pod red. D. Briggs i M. P. Sikha. Moscow. Mir, 1987]



Л. И. ПОДКАМЕНЬ, М. С. ГАВРИЛЯК

Украина, Черновицкий национальный университет им. Юрия Федьковича  
E-mail: mgavrylyak@gmail.comДата поступления в редакцию  
20.11 2009 г. — 15.07 2010 г.Оппоненты к. т. н. И. Л. МИХЕЕВА  
(ЗАО «Украналит», г. Киев);  
д. ф.-м. н. Г. Ю. РУДЬКО  
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

## ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ

*Разработанная автоматизированная установка позволяет оценивать изменения показателя преломления водных растворов с точностью до  $10^{-7}$ . Приведены методические рекомендации по ее использованию.*

Актуальной задачей современной электронной техники является разработка систем для контроля качества различных веществ, в том числе и жидких сред, особенно воды и ее растворов. Существуют различные методы оценки их качества, начиная от измерений показателя преломления и проводимости и заканчивая биохимическим анализом [1]. Кроме того, разработка методик высокочувствительного экспресс-тестирования влияния разнообразных естественных и техногенных факторов на воду и водные растворы существенно важна в задачах экологических служб и в лечебно-профилактической практике современной медицины [2].

Среди известных технических решений, которые направлены на исследование показателя преломления воды и ее структурных изменений, особого внимания заслуживают интерференционные и поляризационно-интерференционные методы [3]. В этом случае используется корреляционный подход к описанию объекта исследования. Как известно, изменение фазовой скорости электромагнитной волны в среде обусловлено интерференцией первичной (облучающей) волны с вторичными, рассеянными отдельными элементами среды, волнами. В результате интерференции на выходе возникает фазовая задержка волны, которая и определяет изменение состояния (структуры) вещества. Изменение его структуры приводит к возмущению межмолекулярных связей системы и проявляется в изменении ее показателя преломления [4].

Исходя из этого, целью настоящей работы было создание установки для оценки изменения показателя преломления водных растворов с точностью не менее  $10^{-7}$ .

На основе ранее проведенных авторами исследований [5, 6], была реализована соответствующая оптоэлектронная установка, блок-схема которой приведена на рис. 1.

Поток излучения He-Ne-лазера с длиной волны  $\lambda=0,63$  мкм расширяется с помощью телескопиче-

ской системы, которая состоит из микрообъектива 2, диафрагмы 3 и объектива 4. Зеркала 7, 8 и светоделительный кубик 5 являются элементами интерферометра Майкельсона, который настроен на нулевую интерференционную полосу. В объектном плече интерферометра находится кювета 6 с исследуемой жидкостью. В процессе эксперимента проводится механическое перемешивание жидкости в кювете, после чего показатель преломления раствора изменяется, а значит, изменяется и разница оптического пути волн в объектном и опорном плечах интерферометра. На выходе интерферометра получаем неоднородное распределение интенсивности, которое свидетельствует о том, что в разных точках кюветы значения показателя преломления жидкости различны. Диаметр диафрагмы 14 выбирается при подготовке эксперимента для каждого исследуемого раствора отдельно, в зависимости от однородности результирующей интерференционной картины. Диафрагма должна быть меньше геометрического размера наблюдаемого интерференционного минимума. Фотоприемник 15 регистрирует интенсивность излучения, которое прошло через диафрагму 14. На управляющую пьезокерамику 9

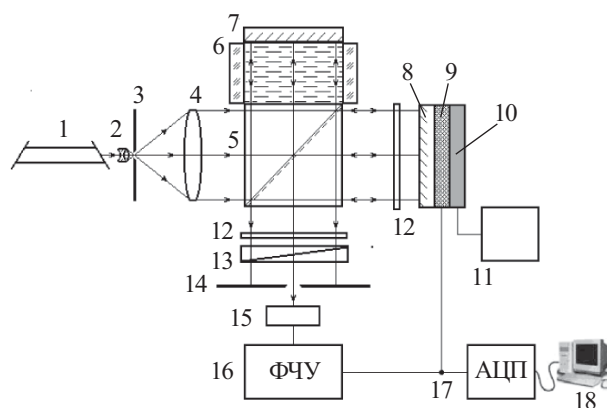


Рис. 1. Схема для измерения изменения показателя преломления жидкости:

1 — лазер; 2 — микрообъектив; 3 — микрометрическая диафрагма; 4 — объектив; 5 — светоделительный кубик; 6 — кювета с исследуемой жидкостью; 7, 8 — зеркала; 9 — управляющая пьезокерамика; 10 — модулирующая пьезокерамика; 11 — источник постоянного напряжения; 12 — пластинка толщиной  $\lambda/4$ ; 13 — поляризатор; 14 — диафрагма диаметром 0,05 мм; 15 — фотоприемник; 16 — фазочувствительный усилитель; 17 — АЦП; 18 — компьютер

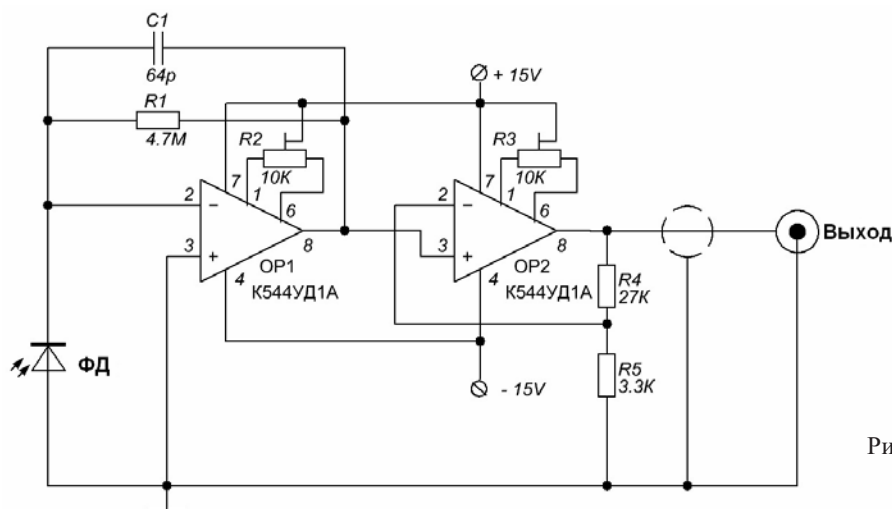


Рис. 2. Принципиальная схема фотоприемника с усилителем

подается синусоидальное напряжение, которое приводит к модуляции интенсивности сигнала с выхода интерферометра. Электрический сигнал от фотоприемника предварительно усиливается и поступает на фазочувствительный усилитель 16. Этот усилитель сравнивает полученный сигнал с модулирующим напряжением и подает такой сигнал на управляющую пьезокерамику 9, который компенсирует смещение интерференционного минимума и является измеряемой величиной. Управляющий сигнал, который несет информацию об изменении оптического пути в объектном плече интерферометра и, опосредованно, об изменении показателя преломления исследуемой жидкости, с помощью АЦП записывается в компьютере 18. Модулирующая пьезокерамика 10 служит для задания начального значения разницы оптического пути в плечах интерферометра. Управление модулирующей пьезокерамикой осуществляется с помощью источника постоянного напряжения 11.

Погрешность измерения показателя преломления  $n$  определяется точностью измерения оптического пути волн в плечах интерферометра. Для ее определения найдем связь между изменением показателя преломления  $\Delta n$  и изменением напряжения на управляющей пьезокерамике  $\Delta U$ , используя соотношение

$$2\Delta l \cdot \Delta n = \lambda (\Delta U / U_n),$$

где  $\Delta l$  — толщина кюветы;

$U_n$  — напряжение на моделирующей пьезокерамике.

В предлагаемой установке  $\Delta l = 15$  мм,  $\lambda = 0,6328$  мкм. Значение  $U_n = 70$  В приводит к изменению разницы оптического пути волн в плечах интерферометра на заданную величину  $\lambda$ .

Поскольку точность измерения напряжения в системе «интерферометр—АЦП—компьютер» составляет 0,1 В, точность измерения показателя преломления будет соответственно равна

$$\Delta n = \lambda \cdot \Delta U / (2\Delta l \cdot U_n) \approx 10^{-7}.$$

Таким образом, при корректном согласовании оптического блока с приемным, усилительным и регистрирующим блоками установка позволяет определять изменение показателя преломления с точностью до седьмого знака после запятой.

Рассмотрим отдельные элементы разработанной общей схемы электрической части прибора. Принципиальная схема фотоприемника с усилителем представлена на рис. 2.

В качестве фотоприемника использован фотодиод ФД-288, включенный по фотогальванической схеме, перед которым размещена диафрагма 1 диаметром 50 мкм. Такая схема обеспечивает зависимость напряжения от интенсивности падающего излучения, близкую к линейной. В качестве операционного усилителя была использована микросхема K544УД1А. В ходе экспериментов оказалось, что для получения рабочего значения напряжения на выходе необходимо дополнительно усилить сигнал. С этой целью на операционном усилителе OP2 был выполнен неинвертирующий усилитель с коэффициентом усиления, определяемым сопротивлением резисторов R4 и R5. Резисторы R2 и R3 служат для балансирования усилителей и задают смещение напряжения на выходе. Измерения показали, что сигнал на выходе может достигать значений от 2,5 до 4 В.

Принципиальная схема блока обработки информации показана на рис. 3. В качестве компараторов OP1 и OP2 выбрана микросхема LM211 производства фирмы Texas Instruments (США). Если амплитуда сигнала от фотоприемника составляет 2,5 В, то точность измерения показателя преломления может составлять от  $0,6 \cdot 10^{-8}$  (при типичном значении минимальной разницы напряжений компаратора) до  $2,5 \cdot 10^{-8}$  в худшем случае. Другой особенностью этой микросхемы является ее способность работать от однополярного источника питания. Микросхема имеет выход с открытым коллектором, что позволяет путем подбора резисторов R2 и R9 задавать амплитуду импульсов на выходе компаратора [7]. Сигнал от усилителя фотоприемника поступает на неинвертирующий вход компаратора OP1. К инвертирующему входу компаратора через делитель на резисторах R4 и R7 подключен конденсатор C2. Чтобы не перегружать выход логического элемента DD3.1, для дозарядки конденсатора C2 используется схема на основе полевого транзистора VT1 с изолированным затвором и каналом  $n$ -типа, в качестве которого был выбран транзистор BSN254 производства фирмы Philips (Нидерланды) [8]. Если на затвор транзистора подается прямоугольный импульс,

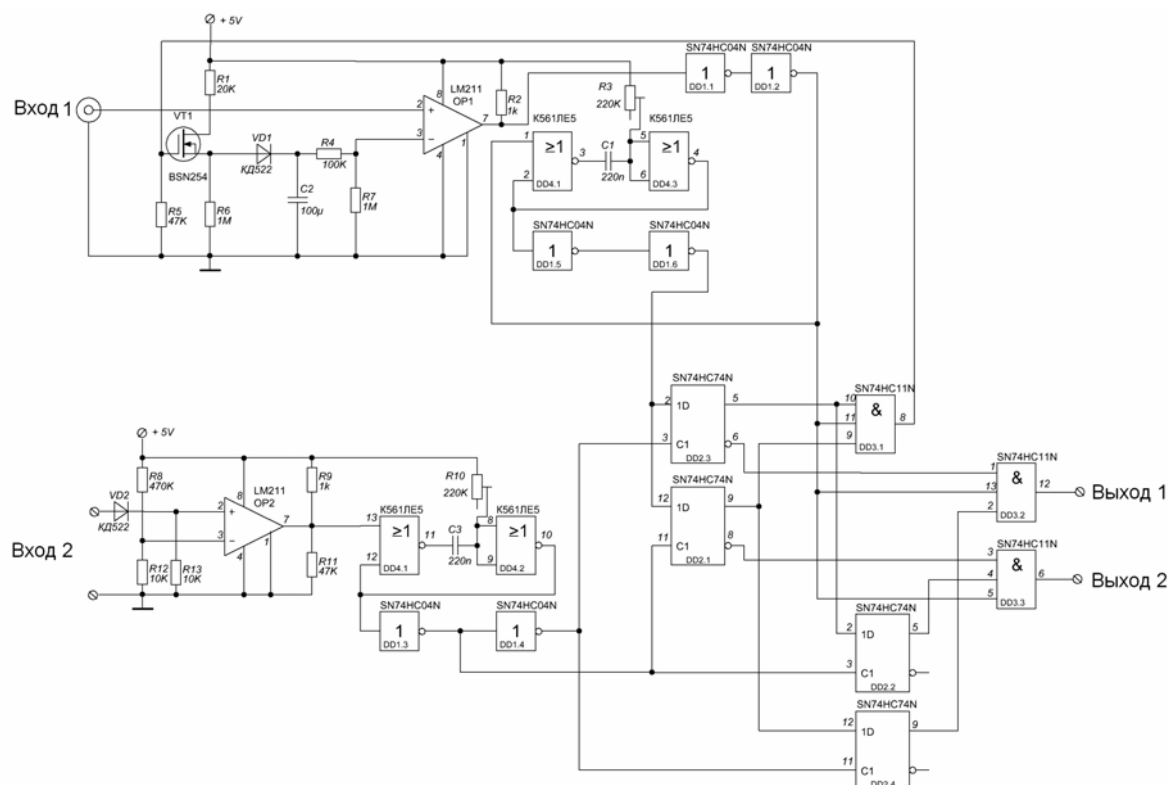


Рис. 3. Принципиальная схема блока обработки информации

то транзистор открывается на время, равное длительности этого импульса. Такие импульсы генерирует логический элемент DD3.1. В этом случае сопротивление транзистора резко уменьшается, и на резисторе  $R6$  возникает напряжение 4,9 В. Через резистор  $R1$  и диод  $VD1$  происходит зарядка конденсатора  $C2$ . На неинвертирующий вход компаратора OP2 подается сигнал, который попадает также и на модулирующую пьезокерамику. Для стабильной работы компаратора сигнал выпрямляется диодом  $VD2$  с резистором  $R13$ . Делитель на резисторах  $R8$  и  $R12$  устанавливает на инвертирующем входе компаратора напряжение 0,1 В. Изменяя это напряжение, можно корректировать фазу сигнала синхронизации в пределах от 0 до  $\pi/2$ .

Перемешивание воды в кювете разрушает водородные связи дальнего порядка, что приводит к изменению средней поляризуемости молекул и, соответственно, к изменению показателя преломления воды, поскольку он связан с поляризуемостью молекул следующим соотношением:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \frac{M}{\rho} = \frac{4\pi N_0}{3} \alpha \theta,$$

где  $M$ ,  $\rho$  — соответственно молярная масса и плотность воды;

$N_0$  — постоянная Лошмидта;

$\alpha$  — поляризуемость молекул;

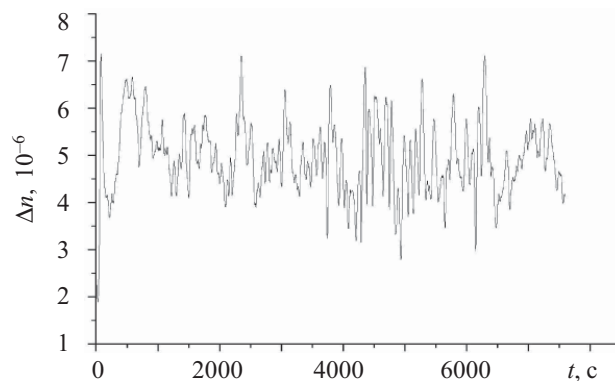
$\theta$  — корреляционный параметр поляризуемости молекул среды.

Поскольку входящий в соотношение параметр  $\theta$  определяется связями дальнего порядка между молекулами, предложенная методика высокоточного из-

мерения изменения показателя преломления воды позволяет оценивать также изменение  $\theta$ .

В качестве оценки корректности использования предлагаемой методики рассмотрим результаты проведенных исследований хаотичности флуктуаций показателя преломления водных растворов третичного бутилового спирта (третбуанола) [9] и сравним выводы с данными [10, с. 312; 11].

Известно, что водный раствор третбуанола характеризуется аномалиями термодинамических, структурных и кинетических характеристик в области малых концентраций. Были исследованы растворы с молярной концентрацией третбуанола от 2 до 12%. Измерения проводили в 38000 экспериментальных точек с частотой 5 Гц. В результате эксперимента получены временные зависимости показателя преломления растворов третбуанола с различной концентрацией [9] (см. например, **рис. 4**).


 Рис. 4. Флуктуации показателя преломления водного раствора третбуанола с концентрацией  $C=2\%$



Для каждого значения концентрации были рассчитаны максимальный показатель Ляпунова (МПЛ)  $\lambda_1$  и корреляционный экспонент (КЭ)  $\nu$ . В результате расчета получены зависимости МПЛ и КЭ от концентрации третбутанола (рис. 5). Кривая зависимости максимального показателя Ляпунова имеет перегиб в пределах значения концентрации 6—8%, а кривая зависимости КЭ имеет минимум, который также приходится на концентрацию 6—7%. Это подтверждает результаты экспериментов [11], где отмечается наличие структурной перестройки раствора в данных пределах концентрации третбутанола. Природа аномальных свойств водных растворов третбутанола остается во многом непонятой. Одним из возможных вариантов объяснения этого явления может быть следующее предположение. Если рассматривать структуру воды как кластерную, то, очевидно, между кластерами имеются полости. При добавлении к воде малого количества третбутанола молекулы спирта размещаются в этих полостях, что вызывает стабилизацию структуры воды. С ростом концентрации спирта до 5—6% структура воды начинает разрушаться. Это отражается и на поведении зависимости корреляционного экспонента (рис. 5, б). Увеличение концентрации до 6% приводит к стабилизации структуры раствора и вызывает уменьшение флуктуаций показателя преломления. После этого начинается агрегация молекул спирта и организация вокруг них новой системы водородных связей, которая сопровождается

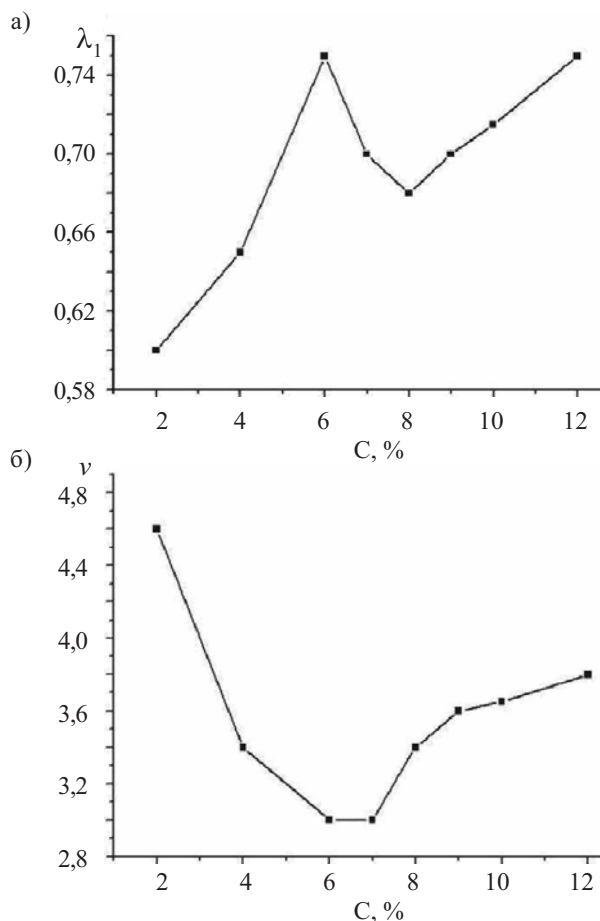


Рис. 5. Концентрационная зависимость флуктуаций МПЛ (а) и КЭ (б) показателя преломления раствора третбутанола

ростом корреляционного экспонента и показателя Ляпунова. Перестройка структуры воды в системе «третбутанол—вода» происходит в достаточно широком интервале концентрации (от 4 до 8%), но поворотной точкой в этом процессе является концентрация 6%, при которой завершается разрушение структуры воды и возникает новая, менее упорядоченная структура раствора.

Следует отметить, что подобная идея оценки показателя преломления водных растворов была использована в методике, основанной на эффекте плазмонного резонанса [12], однако там из-за малой толщины исследуемого объекта была достигнута точность порядка всего лишь  $10^{-4}$ .

\*\*\*

Таким образом, результаты проведенных экспериментальных исследований показали эффективность предлагаемых схем установки и целесообразность ее использования для оценки изменения показателя преломления водных растворов с высокой степенью точности (до  $10^{-7}$ ).

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. [http://www.ecount.ru/artikle\\_61.html](http://www.ecount.ru/artikle_61.html).
2. Pidkamin L. J., Dobrovolskiy Yu. G. The grounds of mechanism of the energy-informative influence of the biological activators on the organism // Conf. proceed. "Correlation Optics 2009", Ukraine, Chernivtsi, 2009. — P. 186—187.
3. Рашкович Л. Н., Шустин О. А. Новые оптические интерференционные методы исследования кинетики кристаллизации в растворе // Успехи физических наук. — 1987. — Т. 151, № 3. — С. 529—535. [Rashkovich L. N., Shustin O. A. // Uspekhi fizicheskikh nauk. 1987. Vol. 151, N 3. P. 529]
4. Гавриляк М. С., Максимьяк П. П. Стохастизация оптического випромінювання, розсіяного в процесі фазового переходу в нематиці // Науковий вісник Чернівецького нац. ун-ту. Фізика. Електроніка. — 2005. — Вип. 268. — С. 100—102. [Gavrylyak M. S., Maksimyak P. P. // Naukovii visnik Chernivets'kogo nats. un-tu. Fizika. Elektronika. 2005. Iss. 268. P. 100]
5. Підкамінь Л. Й., Гавриляк М. С., Мельничук З. М. Реєстрація ефектів біоенергоінформаційного впливу // Науковий вісник Чернівецького нац. ун-ту. Фізика. Електроніка. — 2005. — Вип. 261. — С. 92—95. [Pidkamin' L. I., Gavrylyak M. S., Mel'nychuk Z. M. // Naukovii visnik Chernivets'kogo nats. un-tu. Fizika. Elektronika. 2005. Iss. 261. P. 92]
6. Gavrylyak M. S., Kirsh M. L., Podkamen L. I. The investigation of energy-informational influence of iconographic biocorrector // Conf. proceed. "Correlation Optics 2007", Ukraine, Chernivtsi. — 2007. — P. 255—256.
7. Texas Instruments, LM111, LM211, LM311 Differential Comparators with strobes, 2003. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/lm311.pdf>.
8. Philips Semiconductor, BSN254; BSN254A N-channel enhancement mode vertical D-MOS transistor, 19 February 2002. [http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/philips/BSN254\\_BSN254A\\_3.pdf](http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/philips/BSN254_BSN254A_3.pdf).
9. Gavrylyak M. S. Investigation of dynamic fluctuations of refraction index of water tertiary butanol solutions // Proc. SPIE. — 2008. — Vol. 7008. — P. 700816.
10. Кесслер Ю. М., Зайцев А. Л. Сольвофобные эффекты. — Л.: Химия, 1989. [Kessler Yu. M., Zaitsev A. L. Sol'vofobnye efekty. L.: Khimiya, 1989]
11. Лященко А. К., Стунжас П. А. Структурирование воды молекулами неэлектролитов и растворимость неполярных газов / Журн. структ. химии. — 1980. — Т. 21, № 5. — С. 106—111. [Lyashchenko A. K., Stunzhas P. A. / Zhurn. strukt. khimii. 1980. Vol. 21, N. 5. P. 106]
12. Маслюк Л. Н., Самойлов А. В., Ушенин Ю. В. Использование спектрометра плазмонного резонанса для регистрации энергоинформационного воздействия на структуру воды // Мат. науч.-практич. семинара «Энергоинформационные процессы — природа и способы защиты». — Украина, Черновцы. — 2008. — Вип. 1. — С. 171—178. [Maslyuk L. N., Camoilov A. V., Ushenin Yu. V. // Mat. nauch. praktich. seminar «Energoinformatsionnye protsessy priroda i sposoby zashchity». Ukraine, Chernovtsy. 2008. Iss. 1. P. 171]

Д. т. н. В. В. ОДИНОКОВ, к. ф.-м. н. Г. Я. ПАВЛОВ

Россия, Москва, Зеленоград, ОАО «НИИ точного машиностроения»  
E-mail: info@niitm.ru

## НОВОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МИКРО-, НАНО- И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Развитие радиоэлектроники и нанотехнологий в различных областях науки и техники требует разработки нового функционально различного технологического оборудования, в котором в качестве базовых реализуются плазменно-термические процессы.

НИИ точного машиностроения (НИИТМ) специализируется на разработке вакуумного оборудования для технологических процессов нанесения тонких пленок, плазмохимического травления, газофазного осаждения стимулированного плазмой (PECVD), а также физико-термического оборудования для осуществления процессов отжига, диффузии, окисления и эпитаксии, в том числе быстрого термического.

Приоритетное направление деятельности НИИТМ — создание оборудования для реализации инновационных технологических процессов в микро-, нано-, радиоэлектронике, микромеханике, а также для синтеза наноматериалов (рис. 1).

Новые разработки НИИТМ — комплекты технологического оборудования для технического обучения, научных исследований, отработки технологических процессов, а также для обеспечения мелкосерийного производства на предприятиях малого и среднего бизнеса, такие как:

- технологическое оборудование для индивидуальной обработки подложек (пластин) со шлюзовой загрузкой;
- малогабаритное физико-термическое оборудование;
- малогабаритное вакуумное оборудование настольного типа «МВУ ТМ».

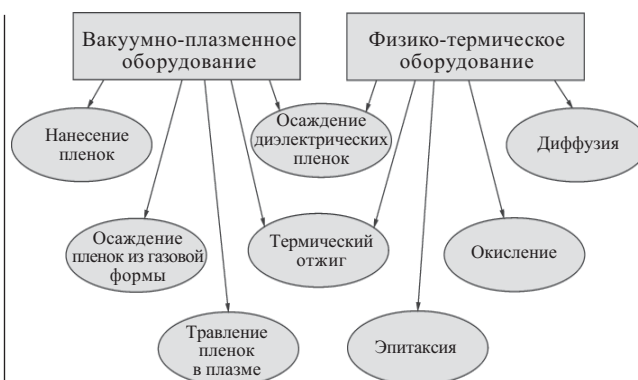


Рис.1. Технологические направления разрабатываемого оборудования

**Комплект технологического оборудования индивидуальной обработки подложек (пластин) со шлюзовой загрузкой (рис. 2)**, предназначен для разработки, исследования и реализации технологических процессов в микро-, нано-, радиоэлектронике.

♦ **Магна ТМ-200** Нанесение многослойных или многокомпонентных металлических и диэлектрических слоев методом магнетронного распыления, в том числе для формирования наноструктурных каталитических слоев (Fe, Ni, Co и др.).

• Магнетронное распылительное устройство — мультикатодное с тремя мишенями Ø100 мм или планарное с мишенью Ø280 мм.

• Ионная очистка подложек перед нанесением слоев.



Рис. 2. Комплект технологического оборудования индивидуальной обработки подложек (пластин) со шлюзовой загрузкой

- Скорость нанесения
  - металлических слоев: до 0,5 мкм/мин.
  - диэлектрических слоев: до 0,2 мкм/мин.
- Неравномерность слоев по толщине —  $\pm 3\%$ .
- Температура подложек — до 300°C.

♦ **Плазма ТМ-200** Плазмохимическое и реактивно-ионное травление проводящих и диэлектрических материалов, в том числе для формирования наноструктур и микроэлектронных механических систем (МЭМС).

• Высококачественный источник индуктивно связанной плазмы (ICP).

• Система гелиевого охлаждения подложек на рабочем столе с источником напряжения смещения на подложку.

- Неравномерность травления  $\pm 2\%$ .
- Скорость травления
  - кремния: 1—3 мкм/мин;
  - двуокиси кремния, кварца, стекла «пирекс»: 0,5—1 мкм/мин.
- Аспектное соотношение: 1/10 — 1/30.

♦ **Изофаз ТМ-200** Осаждение проводящих и диэлектрических материалов ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , Si, SiC) в вакуумном реакторе из газовой фазы с плазменной активацией в ВЧ-плазме, в том числе для формирования алмазоподобных пленочных структур и углеродных нанотрубок.

• Источник плазмостимулированного газозависимого осаждения (PECVD).

• Рабочий стол с нагревателем до 800°C и источником напряжения смещения на подложку.

- Безмасляная система откачки.
- Многоканальная газовая система.
- Неравномерность пленок по толщине —  $\pm 3\%$ .

*Общие особенности установок:*

- Индивидуальная обработка подложек до  $\varnothing 200$  мм.
- Шлюзовая камера загрузки/выгрузки подложек.
- Безмасляная система откачки на базе турбомолекулярного и форвакуумного насосов.
- Автономная система охлаждения.
- Микропроцессорная система управления.

- Возможность встраивания в “чистую комнату”.
- Возможность объединения двух или трех установок в кластерный комплекс (рис. 3).
- Потребляемая одной установкой мощность — не более 8 кВт.
- Площадь, занимаемая одной установкой — около 2,0 м<sup>2</sup>.

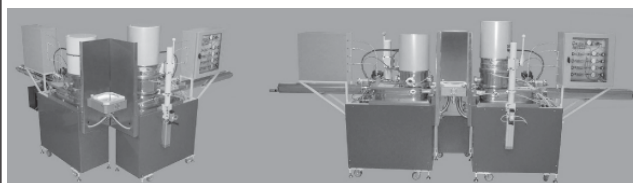


Рис. 3. Мини-кластеры из двух и трех установок

Для реализации различных технологических процессов в одном вакуумно-технологическом цикле две или три установки комплекта могут агрегатироваться в мини-кластеры посредством соединения установок через перегрузочный шлюз.

**Комплект малогабаритного физико-термического оборудования (рис. 4)** предназначен для разработки, исследования и реализации технологических процессов в микро-, нано-, радиоэлектронике.

♦ **Оксид ТМ** Термическая обработка пластин и материалов при нормальном атмосферном давлении (процессы диффузии, окисления, отжига, сушки, разгонки диффузанта, восстановления кристаллических структур).

- Диапазон рабочих температур 300—1100°C.

♦ **Отжиг ТМ** Термическая обработка пластин и материалов в высоком вакууме и газовой среде — процессы отжига, сушки, разгонки диффузанта, восстановления кристаллических структур.

- Диапазон рабочих температур 150—650°C.
- Предельное остаточное давление в реакторе — до  $10^{-4}$  Па.
- Электропитание (3 фазы, 380 В) — не более 12 кВт.

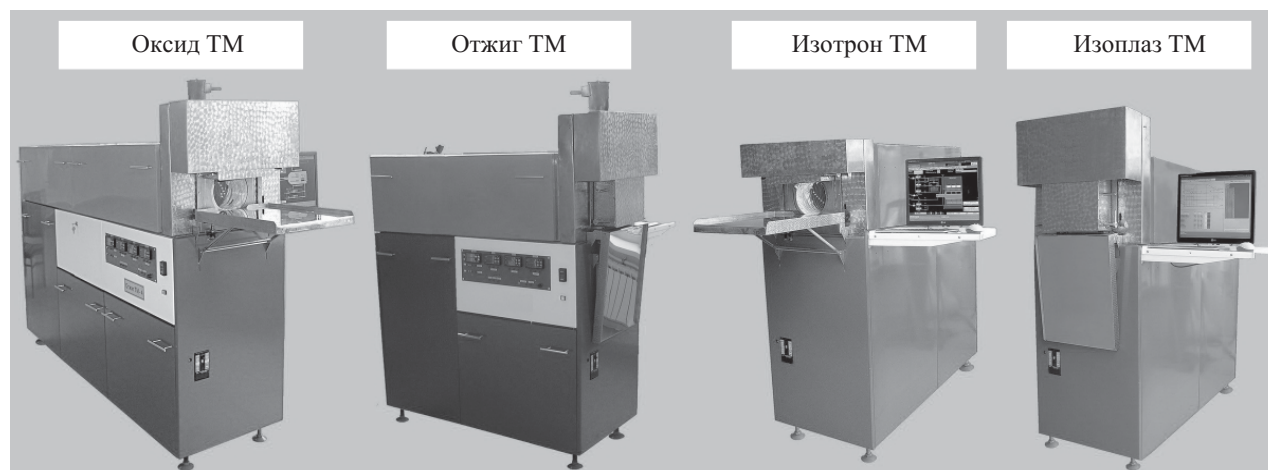


Рис. 4. Комплект малогабаритного физико-термического оборудования



♦ **Изотрон ТМ** Процессы осаждения слоев из газовой среды при пониженном давлении (форвакууме), в том числе слоев легированной и нелегированной двуокиси кремния.

- Диапазон рабочих температур 250—900°C.
- Предельное остаточное давление в реакторе — не более 1,3 Па.
- Рабочее давление 10—150 Па.
- Технологические газы: моносилан, фосфин, кислород, азот и другие.

♦ **Изоплаз ТМ** Плазмохимическое осаждение диэлектрических нелегированных и легированных слоев оксида кремния и слоев нитрида кремния при пониженном давлении с плазменной активацией реагентов.

- Частота и мощность ВЧ-генератора — 440 кГц; 1 кВт.
- Диапазон рабочих температур 250—650°C.
- Предельное остаточное давление в торе — не более 1,3 Па.
- Рабочее давление 5—150 Па.
- Технологические газы: моносилан, аммиак, закись азота, фосфин, адиборан, кислород, фреон.

*Общие технические характеристики установок:*

- Диаметр обрабатываемых пластин — до 100 мм.
- Количество одновременно обрабатываемых пластин — 25 (для Оксид ТМ — до 120).
- Однореакторная печь резистивного нагрева горизонтального типа.
- Кварцевый реактор с герметизируемой рабочей зоной.
- Трехсекционный спиральный нагреватель с термопарой в каждой секции.
- Газовая система (2—7 каналов).
- Безмасляная вакуумная система откачки.
- Микропроцессорная система управления.
- Возможность подключения автономной системы водяного охлаждения.
- Возможность встраивания в «чистую» комнату.

**Комплект малогабаритного вакуумного оборудования настольного типа «МВУ ТМ» (рис. 5)** предназначен для мелкосерийного производства, технологического обучения, научных исследований, отработки технологических процессов.

Отличительной особенностью оборудования комплекта «МВУ ТМ» является настольное размещение рабочей камеры, а также систем и устройств, обеспечивающих функционирование установок. Установки малоэнергоёмки, а занимаемая ими площадь незначительна.

♦ **МВУ ТМ-Магна** Нанесение металлов и диэлектриков методом магнетронного распыления.

♦ **МВУ ТМ-ТИС** Напыление пленок металлов методом термического испарения.

♦ **МВУ ТМ-Изофаз CVD** Плазмохимическое газофазное осаждение пленок с диодной системой.

♦ **МВУ ТМ-Изофаз CVD ICP** Плазмохимическое газофазное осаждение пленок с ICP источником плазмы.

♦ **МВУ ТМ-Плазма РИТ** Травление слоев и материалов методом реактивно-ионной обработки.

♦ **МВУ ТМ-Плазма ПХТ** Плазмохимическое травление слоев и материалов в плазме диодного разряда.

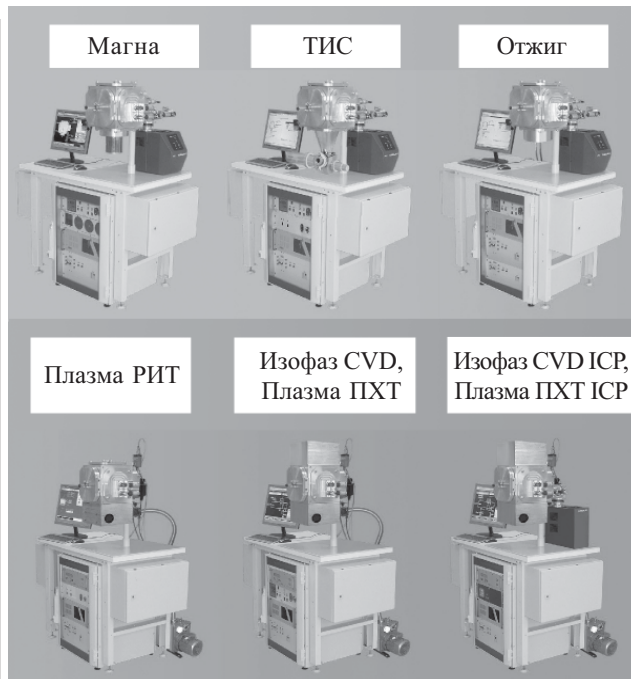


Рис. 5. Комплект малогабаритного вакуумного оборудования настольного типа «МВУ ТМ»

♦ **МВУ ТМ-Плазма ПХТ ICP** Плазменное травление слоев и материалов с ICP источником плазмы.

♦ **МВУ ТМ-Отжиг** Термический отжиг и сушка слоев и материалов.

*Особенности установок МВУ ТМ-Магна, МВУ ТМ-ТИС, МВУ ТМ-Отжиг:*

- Последовательная индивидуальная обработка подложек в одном технологическом цикле:
  - 2 шт. — Ø150 мм;
  - 4 шт. — Ø76 мм, Ø100 мм;
  - 8 шт. — Ø60 мм, 60×48 мм.
- Планетарный подложкодержатель с тремя степенями вращения.
- Подготовка поверхности подложек — нагрев и ионная очистка.

*Особенности установок МВУ ТМ-Изофаз CVD, МВУ ТМ-Изофаз CVD ICP:*

- Индивидуальная обработка подложек до Ø150 мм (100×100 мм).
- Нагреваемый подложкодержатель.

*Особенности установок МВУ ТМ-Плазма РИТ, МВУ ТМ-Плазма ПХТ, МВУ ТМ-Плазма ПХТ ICP:*

- Индивидуальная обработка подложек до Ø150 мм (100×100 мм);
- Охлаждаемый подложкодержатель.

*Общие особенности установок:*

- Автоматизированное управление от персонального компьютера.
- Малогабаритная безмасляная вакуумная система откачки.
- Автономная система охлаждения.
- Потребляемая мощность одной установкой — не более 3 кВт.
- Площадь, занимаемая одной установкой — около 1,5 м<sup>2</sup>.

С. А. ДУШКИН, В. Б. ИВАНСКИЙ, А. М. КУРОВ<sup>1</sup>,  
В. А. ОДИНЕЦ, к. ф.-м. н. А. Н. ОРОБИНСКИЙ

Украина, г. Харьков, ННЦ «Институт метрологии»,

<sup>1</sup>Институт медицинской радиологии им. С. П. Григорьева АМНУ

E-mail: orobin@mail.ru, imr@online.kharkiv.net

Дата поступления в редакцию  
02.04 2010 г. — 21.03 2011 г.

Оппонент к. т. н. Б. А. ДЕМЬЯНЧУК  
(ОНУ им. Мечникова, г. Одесса)

## ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИК РЕНТГЕНОВСКИХ УСТАНОВОК

*Рассчитаны погрешности при измерении средней энергии, коэффициента однородности, первого и второго слоя половинного ослабления рентгеновских установок. Проведено сравнение погрешностей с требованиями стандартов.*

Рентгеновские установки (РУ) в медицинских учреждениях подразделяются на терапевтические — для лечения заболеваний; диагностические — для выявления заболеваний, обследования при различных травмах и т. д.; метрологические — для настройки, аттестации и поверки дозиметров рентгеновского излучения.

Основными характеристиками РУ являются средняя энергия рентгеновского излучения, коэффициент однородности, первый слой половинного ослабления (СПО1) и второй слой половинного ослабления (СПО2) [1]. В каждой области применения РУ имеют свои особенности.

Терапевтические и диагностические РУ работают при известной средней энергии, коэффициенте однородности и мощности дозы (МД) рентгеновского излучения (здесь под дозой понимают индивидуальный эквивалент дозы  $H_p(0,07)$  и поглощенную дозу в воде  $D_w$ ), причем для лечения и диагностики разных частей тела человека выбирают соответствующую среднюю энергию, коэффициент однородности и МД.

Метрологические РУ работают в заданных диапазонах средних энергий, коэффициентов однородности и МД (здесь под дозой понимают  $H_p(0,07)$ ,  $D_w$ , экспозиционную дозу  $X$ , амбиентный эквивалент дозы  $H^*(0,07)$  и керму в воздухе  $K$ ).

Для обеспечения радиационной безопасности людей при их лечении и диагностике рентгеновские установки должны иметь строго заданные характеристики в зависимости от области применения, поскольку какие-либо отклонения могут привести или к переоблучению человека, вызывающему лучевые поражения, или к недооблучению, что приводит к рецидивам онкологических заболеваний.

Метрологические РУ должны иметь характеристики, обеспечивающие заданные диапазоны средней энергии, коэффициента однородности и мощности доз для настройки, аттестации и поверки дозиметров рентгеновского излучения, с помощью которых измеряют дозы рентгеновского излучения, необходимые для

лечения и диагностики, и проводится дозиметрический контроль пациентов и медицинского персонала.

Поэтому при конструировании и производстве РУ необходимо измерять МД, СПО1, который определяет среднюю энергию, и СПО2, который совместно с СПО1 определяет коэффициент однородности.

Для измерения МД в настоящее время применяют высокоточные дозиметры рентгеновского излучения, например PTW-UNIDOS.

Измерению характеристик рентгеновского излучения посвящен ряд работ. Например, в [2, с. 8] выполнены измерения СПО1 для одной энергии с погрешностью менее 10%, в [3, с. 263—265] — расчет и измерения характеристик РУ PANTAK HF160: средней энергии, коэффициента однородности, СПО1 и СПО2; в [4, с. 13] приведены результаты измерений СПО1 РУ PANTAK HF160. В [3, 4] получено соответствие характеристик РУ PANTAK HF160 требованиям, приведенным в [5, табл. 4]. Однако в литературе отсутствует анализ составляющих погрешностей измерений и не приведены выражения для их расчета.

В настоящей работе определены выражения для расчета погрешностей при измерении средней энергии рентгеновского излучения, коэффициента однородности, СПО1 и СПО2.

### Погрешности при измерении СПО1 и $d_{1/4}$

Среднюю энергию, коэффициент однородности, СПО1 и СПО2 можно измерить при помощи дозиметра рентгеновского излучения [5, с. 18].

Процесс измерения включает в себя два этапа — сначала проводят прямые измерения МД или кермы в воздухе ( $K$ ) рентгеновского излучения при различных дополнительных фильтрах из алюминия или меди, затем выполняют обработку результатов измерений: строят зависимость  $K=f(d_\phi)$  или  $K/K_0=f(d_\phi)$  ( $K_0$  — керма в воздухе до фильтра;  $d_\phi$  — толщина дополнительного фильтра), по которой определяют толщину  $d_{1/2}$ =СПО1 при  $K=0,5K_0$  и  $d_{1/4}$  при  $K=0,25K_0$ ; вычисляют СПО2= $d_{1/4}-d_{1/2}$  и коэффициент однородности  $h$ =СПО1/СПО2. Среднюю энергию  $\bar{E}$  определяют по зависимости  $\bar{E}=f(d_{1/2Al,Cu})$ , где  $d_{1/2Al,Cu}$  — табулированные значения СПО для Al и Cu.

Абсолютная погрешность при определении СПО1 ( $d_{1/2}$ ) и  $d_{1/4}$  определяется следующими погрешностями: — погрешностью при измерении кермы в воздухе рентгеновского излучения —  $\Delta_K d_{1/2}$  и  $\Delta_K d_{1/4}$ ;

— погрешностью установки напряжения на аноде рентгеновской трубки —  $\Delta_U d_{1/2}$  и  $\Delta_U d_{1/4}$ ;

— погрешностью, связанной с нестабильностью напряжения на аноде и тока анода рентгеновской трубки, —  $\Delta_n d_{1/2}$  и  $\Delta_n d_{1/4}$ ;

— погрешностью аппроксимации зависимости  $K/K_0=f(d_\phi)$  —  $\Delta_a d_{1/2}$  и  $\Delta_a d_{1/4}$ ;

— погрешностями при измерении толщины  $d_i$  дополнительных фильтров, необходимых для измерения СПО1 и  $d_{1/4}$ , —  $\Delta_{-} d_{1/2}$ ,  $\Delta_{+} d_{1/2}$ ,  $\Delta_{-} d_{1/4}$  и  $\Delta_{+} d_{1/4}$  (как правило,  $\Delta_{-} d_{1/2} = \Delta_{+} d_{1/2} = \Delta_{-} d_{1/4} = \Delta_{+} d_{1/4} = \Delta_\phi$ ).

Для измерения СПО1 и  $d_{1/4}$  применяют четыре дополнительных фильтра (СПО1 —  $d_1$  и  $d_2$ ;  $d_{1/4}$  —  $d_3$  и  $d_4$ ). В ситуациях когда отсутствуют фильтры заданной толщины, каждый из четырех фильтров может быть составлен из нескольких фильтров. Тогда при построении зависимости  $K/K_0=f(d_\phi)$  используют значения  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  и  $d_4$ , а при расчете погрешностей необходимо учитывать погрешности при измерении толщины каждого фильтра.

При суммировании погрешностей считаем, что они изменяются нерегулярным образом, оставаясь в границах допускаемой основной погрешности, поэтому их можно считать условно постоянными. Для суммирования погрешностей применяем квазистатистический метод [6, с. 71—72].

Суммарную абсолютную погрешность при измерении СПО1 представим в виде

$$\Delta d_{1/2} = \Delta \text{СПО1} = k \left( (\Delta_K d_{1/2})^2 + (\Delta_U d_{1/2})^2 + (\Delta_n d_{1/2})^2 + (\Delta_a d_{1/2})^2 + m_{1/2} (\Delta_\phi)^2 \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент, который зависит от доверительной вероятности  $P$ ,  $k=1,1$  при  $P=0,95$  [7, раздел 4];  $m_{1/2}$  — количество фильтров, необходимых для измерения СПО1.

Разделив (1) на  $d_{1/2}$ , перейдем от абсолютной погрешности к относительной при  $P=0,95$ :

$$\delta d_{1/2} = \delta \text{СПО1} = 1,1 \left( (\delta_K d_{1/2})^2 + (\delta_U d_{1/2})^2 + (\delta_n d_{1/2})^2 + (\delta_a d_{1/2})^2 + m_{1/2} (\Delta_\phi / d_{1/2})^2 \right)^{1/2}; \quad (2)$$

Аналогично представим суммарную относительную погрешность при измерении  $d_{1/4}$ :

$$\delta d_{1/4} = 1,1 \left( (\delta_K d_{1/4})^2 + (\delta_U d_{1/4})^2 + (\delta_n d_{1/4})^2 + (\delta_a d_{1/4})^2 + m_{1/4} (\Delta_\phi / d_{1/4})^2 \right)^{1/2}; \quad (3)$$

где  $m_{1/4}$  — количество фильтров, необходимых для измерения  $d_{1/4}$ .

Определим составляющие погрешностей при измерении СПО1 и  $d_{1/4}$ .

#### Погрешность, связанная с погрешностью при измерении кермы в воздухе рентгеновского излучения

Керма в воздухе рентгеновского излучения, прошедшего через фильтр, с заданной средней энергией, равна  $K=K_0 \cdot \exp(-\mu d_\phi)$ , где  $\mu$  — коэффициент ослаб-

ления рентгеновского излучения с заданной средней энергией в материале, из которого сделан фильтр [8, с. 218]. Тогда  $d_\phi = \ln(K_0/K)/\mu$ , откуда относительные погрешности при измерении  $d_{1/2}$  и  $d_{1/4}$  можно определить как

$$\delta_K d_{1/2} \cong \sqrt{4(\delta_{\text{сл}} K)^2 + (\delta \mu)^2};$$

$$\delta_K d_{1/4} \cong \sqrt{(\delta_{\text{сл}} K)^2 + (\delta \mu)^2}, \quad (4)$$

где  $\delta_{\text{сл}} K$  — случайная относительная погрешность дозиметра при измерении кермы в воздухе;

$\delta \mu$  — изменение коэффициента ослабления за счет изменения средней энергии.

При заданной средней энергии ( $\bar{E}=\text{const}$ )  $\mu=\text{const}$ , т. е.  $\delta \mu=0$ . Значит, относительные погрешности при измерении  $d_{1/2}$  и  $d_{1/4}$  из (4) можно представить как

$$\delta_K d_{1/2} \cong 2\delta_{\text{сл}} K, \quad \delta_K d_{1/4} \cong \delta_{\text{сл}} K. \quad (5)$$

#### Погрешность, связанная с погрешностью установки напряжения на аноде рентгеновской трубки

При изменении напряжения на аноде рентгеновской трубки изменяется средняя энергия [1].

Из (4) при  $\delta_{\text{сл}} K=0$  ( $K=\text{const}$ ) найдем  $\delta_U d_{1/2} = \delta_U d_{1/4} = \delta \mu_{\bar{E}}$ . Погрешность, связанная с погрешностью установки напряжения на аноде рентгеновской трубки ( $\delta U_a$ ), определяется изменением коэффициента ослабления материала, из которого сделаны фильтры, необходимые для измерения СПО, в зависимости от средней энергии.

Изменение  $\mu$  можно определить, зная изменение средней энергии ( $\delta_U \bar{E}$ ) в зависимости от  $\delta U_a$ . Зависимости  $\delta_U \bar{E}=f(\delta U_a)$  для РУ PANTAK HF160 [3, с. 263—265] в диапазоне  $\bar{E}=23—120$  кэВ построим на основе расчетов, приведенных в [1].

Как видно из рис. 1,  $|\delta_U \bar{E}| \leq 0,8\%$  при  $|\delta U_a| \leq 1\%$ . Здесь Q1—Q7 — режимы работы РУ PANTAK HF160, которые зависят от применяемых фильтров и  $U_a$ .

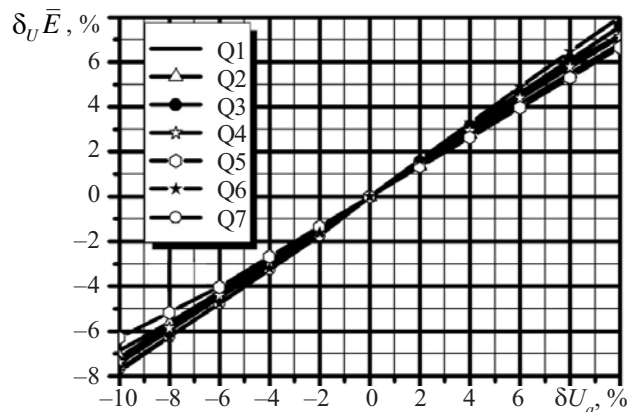


Рис. 1



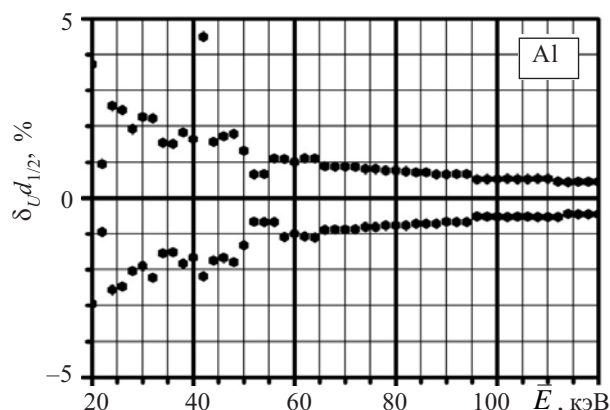


Рис. 2

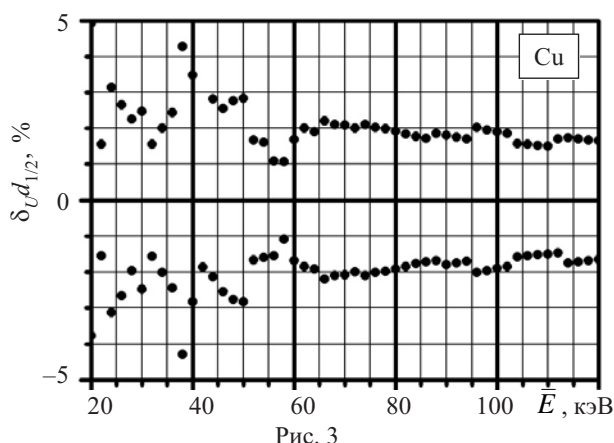


Рис. 3

Зная  $\delta_U \bar{E}$  и зависимости  $d_{1/2 \text{ Al, Cu}} = f(\bar{E})$  [1], относительные положительную и отрицательную погрешности  $\delta_U d_{1/2}$  определим как

$$\delta_U d_{1/2 \pm} = 100 (d_{1/2}(\bar{E}) - d_{1/2}(\bar{E} \pm \Delta_U \bar{E})) / d_{1/2}(\bar{E}), \quad (6)$$

где  $\Delta_U \bar{E} = \bar{E} \cdot \delta_U \bar{E}$ .

Зависимости  $\delta_U d_{1/2 \text{ Al, Cu}} = f(\bar{E})$  при  $\delta_U \bar{E} = 0,8\%$ , рассчитанные по выражениям (6) для Al и Cu численным методом, приведены на рис. 2 и 3, соответственно.

За относительную погрешность  $\delta_U d_{1/2}$  принимаем максимальное из всех значений  $\delta_U d_{1/2+}$  и  $|\delta_U d_{1/2-}|$ , т. е.  $\delta_U d_{1/2} = \max \{ \delta_U d_{1/2+}; |\delta_U d_{1/2-}| \}$ .

### Погрешности, связанные с нестабильностями напряжения на аноде и тока анода рентгеновской трубки

Нестабильности напряжения на аноде и тока анода рентгеновской трубки приводят к изменению кермы в воздухе. Следовательно, погрешности, связанные с нестабильностями, можно определить из (5) как

$$\left. \begin{aligned} \delta_n d_{1/2} &= 2 \cdot \delta_{n1/2} K; \\ \delta_n d_{1/4} &= \delta_{n1/4} K, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где  $\delta_{n1/2} K = |(K_{01/2} - K_{01}) / K_{01}|$ ,  $K_{01/2} = (K_{01} + K_{02}) / 2$ ,

$$\delta_{n1/4} K = |(K_{01/4} - K_{01}) / K_{01}|, \quad K_{01/4} = (K_{01} + K_{03}) / 2.$$

Здесь  $K_{01}$ ,  $K_{02}$ ,  $K_{03}$  — кермы в воздухе перед измерением СПО1, после измерения СПО1 и  $d_{1/4}$  без дополнительных фильтров, соответственно.

### Погрешность аппроксимации зависимости

$$K/K_0 = f(d_\phi)$$

Рассмотрим интервал  $[d_1, d_2]$  зависимости  $K/K_0 = f(d_\phi)$  при измерении СПО1 (рис. 4).

$$\text{Считаем, что } \frac{K}{K_0} = \exp(-\mu d_\phi) \Big|_{d_\phi=[d_1, d_2]}.$$

Данную зависимость аппроксимируем прямой:

$$\frac{K}{K_0} \Big|_{d_\phi=[d_1, d_2]} = kd + b \quad (\text{рис. 4}).$$

Определим коэффициенты  $k$  и  $b$ :

$$\left. \begin{aligned} k &= [\exp(-\mu d_2) - \exp(-\mu d_1)] / (d_2 - d_1); \\ b &= [d_2 \exp(-\mu d_1) - d_1 \exp(-\mu d_2)] / (d_2 - d_1). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Подставив (8) в уравнение прямой, найдем  $d$  при  $K/K_0 = 0,5$ :

$$\begin{aligned} d &= \frac{0,5 - b}{k} = \\ &= \frac{d_2 - d_1 - 2d_2 \cdot \exp(-\mu d_1) + 2d_1 \cdot \exp(-\mu d_2)}{2 \cdot [\exp(-\mu d_2) - \exp(-\mu d_1)]}. \end{aligned} \quad (9)$$

Зададим  $d_1 = d_{1/2} - \tilde{d}$  и  $d_2 = d_{1/2} + \tilde{d}$ , где  $\tilde{d} = \eta d_{1/2}$ . Подставив  $d_1$  и  $d_2$  в (9), после математических преобразований с учетом того, что  $\exp(-\mu d_{1/2}) = 0,5$ ,  $\exp(\mu \tilde{d}) = 2^\eta$ ,  $\exp(-\mu \tilde{d}) = 2^{-\eta}$ ,  $\mu = \frac{\ln 2}{d_{1/2}}$ , получим

$$d = d_{1/2} \eta (2^{\eta+1} - 2^{2\eta} - 1) / (1 - 2^{2\eta}) + d_{1/2}. \quad (10)$$

Погрешность при измерении  $d_{1/2}$  за счет аппроксимации определим как  $\delta_a d_{1/2} = d/d_{1/2} - 1$ . Подставив в это выражение формулу (10), получим

$$\delta_a d_{1/2} = \eta (2^{\eta+1} - 2^{2\eta} - 1) / (1 - 2^{2\eta}). \quad (11)$$

Аналогично рассмотрим интервал  $[d_3, d_4]$  при измерении  $d_{1/4}$  (рис. 4).

Зададим  $d_3 = d_{1/4} - \bar{d}$  и  $d_4 = d_{1/4} + \bar{d}$ , где  $\bar{d} = \bar{\eta} d_{1/4}$ . С учетом того, что  $\exp(-\mu d_{1/4}) = 0,25$ ,  $\exp(\mu \bar{d}) = 2^{2\bar{\eta}}$  и  $\exp(-\mu \bar{d}) = 2^{-2\bar{\eta}}$ ,  $\mu = \ln 4 / d_{1/4}$ , получим

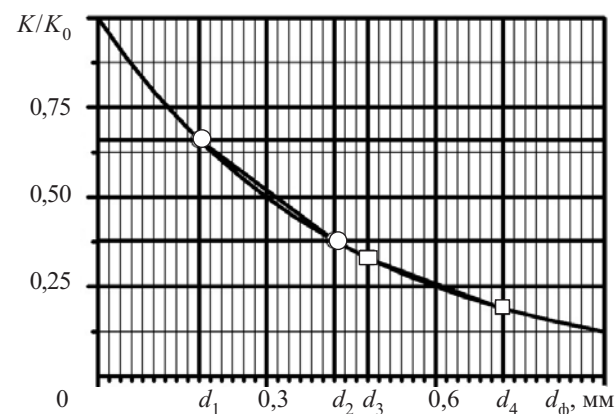


Рис. 4

$$\delta_d d_{1/4} = \bar{\eta}(2^{2\bar{\eta}+1} - 2^{4\bar{\eta}} - 1)/(1 - 2^{4\bar{\eta}}). \quad (12)$$

Подставив первые выражения (5) и (7), (11) в (2) и вторые выражения (5) и (7), (12) в (3), получим выражения для вычисления  $\delta\text{СПО1}$  и  $\delta d_{1/4}$

$$\left. \begin{aligned} \delta \text{CPOI} = & 1, 1 \left( 4 \left[ (\delta_{\text{cl}} K)^2 + (\delta_{\text{h}1/2} K)^2 \right] + \right. \\ & + (\delta_U d_{1/2})^2 + \left. \left( \frac{\eta (2^{\eta+1} - 2^{2\eta} - 1)}{1 - 2^{2\eta}} \right)^2 + \right. \\ & \left. + m_{1/2} \left( \frac{\Delta_\phi}{\text{CPOI}} \right)^2 \right)^{1/2} ; \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

## Погрешность при измерении средней энергии рентгеновского излучения

Относительная погрешность при измерении средней энергии определяется следующими погрешностями:

— погрешностью, связанной с погрешностью при

измерении СПО1, —  $\delta \bar{E}_{d1/2}$ ;

— погрешностью табулированных значений СПО

для Al и Cu —  $\delta\bar{E}_{0d1/2}$ .

Суммарную относительную погрешность при измерении средней энергии при  $P=0,95$  запишем в виде [6, с. 72]

$$\delta \bar{E} = 1,1 \sqrt{(\delta \bar{E}_{d1/2})^2 + (\delta \bar{E}_{0d1/2})^2}. \quad (14)$$

### Погрешность, связанная с погрешностью при измерении СПО1

Относительные положительную и отрицательную погрешности при измерении  $\bar{E}$  в зависимости от  $d_{1/2AlCu}$  и  $\delta d_{1/2AlCu}$  определим как

$$\delta \bar{E}_{\pm} = 100 (\bar{E}(d_{1/2} \pm \Delta d_{1/2}) - \bar{E}(d_{1/2})) / \bar{E}(d_{1/2}), \quad (15)$$

где  $\Delta d_{1/2} = d_{1/2} \cdot \delta d_{1/2}$ .

Зависимости  $\bar{E} = f(d_{1/2})$  (рис. 5) представим в виде

[illegible]

где  $\beta 0_n = -\frac{\alpha 0_n}{\alpha 1_n}$ ;  $\beta 1_n = \frac{1}{\alpha 1_n}$ ;  $\alpha 0_n$  и  $\alpha 1_n$  были определены в диапазоне энергии от 1 до 300 кэВ при  $n=80$  в [1].

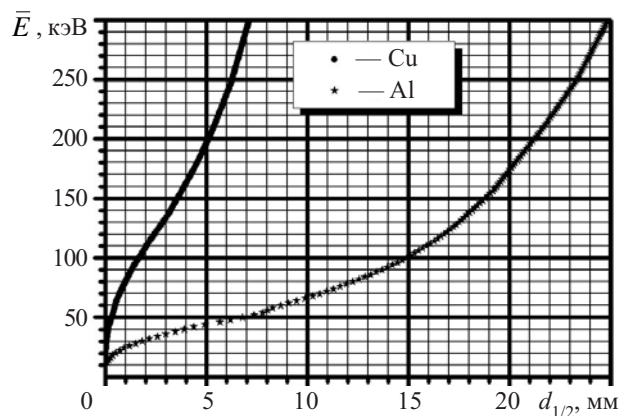


Рис. 5

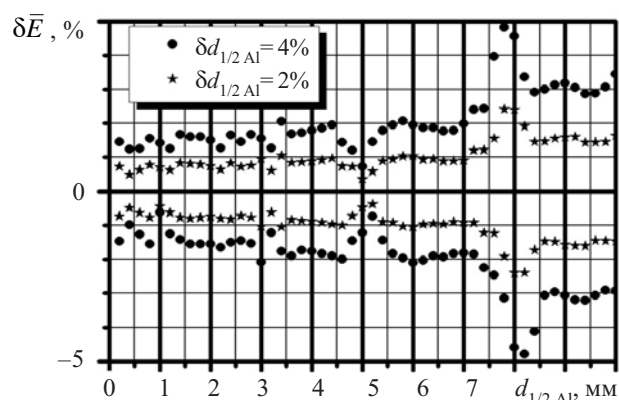


Рис. 6

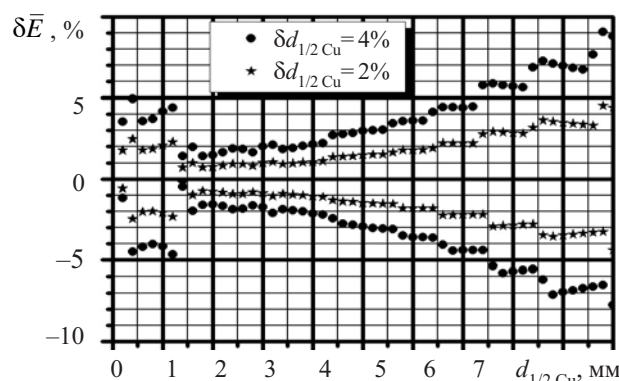


Рис. 7

Зависимости  $\delta \bar{E} = f(d_{1/2, \text{Al, Cu}})$  при известном значении  $\delta d_{1/2}$ , рассчитанные по выражениям (15) для Al и Cu численным методом, приведены на **рис. 6 и 7**, соответственно.

За относительную погрешность при измерении средней энергии  $\delta \bar{E}$  принимаем максимальное значение из  $\delta \bar{E}_+$  и  $|\delta \bar{E}_-|$ , т. е.  $\delta \bar{E} = \max \{ \delta \bar{E}_+; |\delta \bar{E}_-| \}$ .

### Погрешность, связанная с погрешностью табулированных значений СПО для Al и Cu

С учетом того, что  $d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$ , относительную погрешность табулированных значений СПО ( $d_{01/2}$ ) представим в виде

$$\delta_0(d_{01/2}) = \delta(\mu), \quad (17)$$

где  $\delta(\mu)$  — погрешность при измерении линейного коэффициента ослабления рентгеновского излучения;  
 $\mu(E)$  — линейный коэффициент ослабления для энергий, меньших 1500 кэВ [8, с. 220],  $\mu(E) = \tau(E) + \sigma_{\text{ког}}(E) + \sigma_{\text{неког}}(E)$ .

Погрешность  $d_{01/2}$  с учетом (17) представим в виде

$$\delta_0(d_{01/2}) = [\delta\tau(E)]^2 \left[ \frac{\tau(E)}{\mu(E)} \right]^2 + [\delta\sigma_{\text{ког}}(E)]^2 \times \\ \times \left[ \frac{\sigma_{\text{ког}}(E)}{\mu(E)} \right]^2 + [\delta\sigma_{\text{неког}}(E)]^2 \left[ \frac{\sigma_{\text{неког}}(E)}{\mu(E)} \right]^2. \quad (18)$$

Зависимости (18) для Al и Cu в диапазоне энергий от 1 до 300 кэВ, рассчитанные численным методом, приведены на рис. 8.

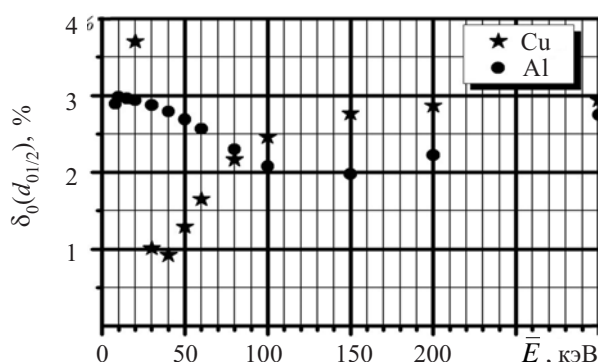


Рис. 8

Погрешность  $\delta\bar{E}_{0d1/2}$  определяется по зависимостям  $\delta\bar{E} = f(d_{1/2} \text{ Al, Cu})$  при  $\delta_0(d_{01/2}) = \text{const}$  (рис. 6 и 7).

#### Погрешности при измерении СПО2 и коэффициента гомогенности

С учетом выражений для определения СПО2 и  $h$  относительные погрешности при их измерении представим в виде

$$\delta_{\text{СПО2}} = \frac{\sqrt{(\Delta_{\text{СПО1}})^2 + (\Delta_{d_{1/4}})^2}}{d_{1/4} - \text{СПО1}} = \\ = \sqrt{h^2 (\delta_{\text{СПО1}})^2 + (1+h)^2 (\delta_{d_{1/4}})^2}; \quad (19) \\ \delta h = \sqrt{(\delta_{\text{СПО1}})^2 + (\delta_{\text{СПО2}})^2} = \\ = \sqrt{(1+h^2) (\delta_{\text{СПО1}})^2 + (1+h)^2 (\delta_{d_{1/4}})^2}.$$

#### Анализ составляющих погрешностей

Все погрешности при измерении СПО1,  $\bar{E}$ , СПО2 и  $h$  в формулах (13), (14) и (19) выражены через  $\delta_{\text{СПО1}}$  и  $\delta d_{1/4}$ . Определим, как можно их уменьшить.

Априорно известны погрешности  $\delta_K$ ,  $\delta_U$ ,  $\delta_a$ , и  $\Delta_\phi$ ; погрешности  $\delta_n$  определяются при измерении.

Определим критерии, при которых можно пренебречь погрешностями  $\delta_a$  и  $\Delta_\phi$  по сравнению с погрешностями  $\delta_K$  и  $\delta_U$ .

Чтобы можно было пренебречь погрешностью  $\delta_a d_{1/2}$  в (2) и  $\delta_a d_{1/4}$  в (3) согласно требованиям [9, п. 1.2.3], должны выполняться неравенства

$$\delta_a d_i \leq \frac{1}{3} \sqrt{(\delta_K d_i)^2 + (\delta_U d_i)^2}, \quad \text{где } i=1/2, 1/4. \quad \text{После}$$

подстановки в эти неравенства первого выражения (5) и (11), второго выражения (5) и (12) получим

$$\left. \begin{aligned} \frac{3\eta(2^{\eta+1} - 2^{2\eta} - 1)}{1 - 2^{2\eta}} &\leq \delta 1; \\ \frac{3\bar{\eta}(2^{2\bar{\eta}+1} - 2^{4\bar{\eta}} - 1)}{1 - 2^{4\bar{\eta}}} &\leq \delta 2, \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

$$\text{где } \delta 1 = \sqrt{4(\delta_{\text{cl}} K)^2 + (\delta_U d_{1/2})^2},$$

$$\delta 2 = \sqrt{(\delta_{\text{cl}} K)^2 + (\delta_U d_{1/2})^2}.$$

Неравенства (20) — трансцендентные, решения которых найдем из зависимостей  $\delta 1 = f(\eta)$  и  $\delta 2 = f(\bar{\eta})$  (рис. 9).

Следовательно, чтобы можно было пренебречь аппроксимацией зависимости  $K/K_0 = f(d_\phi)$  прямыми линиями при определении  $d_{1/2}$  и  $d_{1/4}$ , толщина дополнительных фильтров должна выбираться с учетом  $\eta$  и  $\bar{\eta}$ , которые определяются из неравенств (20) с учетом погрешностей  $\delta 1$  и  $\delta 2$ , т. е.

$$\begin{aligned} d_1 &= \text{СПО1} \cdot (1 - \eta); \quad d_2 = \text{СПО1} \cdot (1 + \eta); \\ d_3 &= d_{1/4} (1 - \bar{\eta}); \quad d_4 = d_{1/4} (1 + \bar{\eta}). \end{aligned} \quad (21)$$

Чтобы можно было пренебречь погрешностями при измерении толщины дополнительных фильтров ( $\Delta_\phi$ ), должны выполняться неравенства [9, п. 1.2.3]

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{m_{1/2}} \left( \frac{\Delta_\phi}{\text{СПО1}} \right) &\leq \frac{1}{3} \sqrt{4(\delta_{\text{cl}} K)^2 + (\delta_U d_{1/2})^2}; \\ \sqrt{m_{1/4}} \left( \frac{\Delta_\phi}{d_{1/4}} \right) &\leq \frac{1}{3} \sqrt{(\delta_{\text{cl}} K)^2 + (\delta_U d_{1/2})^2}, \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

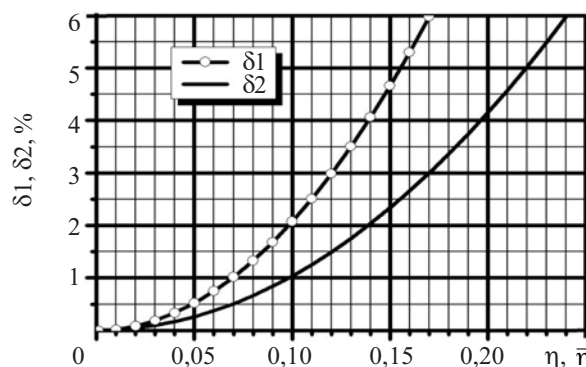


Рис. 9



из которых найдем

$$\left. \begin{aligned} \text{СПО1} \geq \text{СПО1}_{\min} &= \frac{3\sqrt{m_{1/2}}\Delta_{\Phi}}{\sqrt{4(\delta_{\text{сл}}K)^2 + (\delta_U d_{1/2})^2}}; \\ d_{1/4} \geq d_{1/4\min} &= \frac{3\sqrt{m_{1/4}}\Delta_{\Phi}}{\sqrt{(\delta_{\text{сл}}K)^2 + (\delta_U d_{1/2})^2}}. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

С учетом условий (20) и (22) выражения (13) запишем в виде

$$\left. \begin{aligned} \delta \text{СПО1} &\cong 1,1\sqrt{4[(\delta_{\text{сл}}K)^2 + (\delta_{\text{н1/2}}K)^2] + (\delta_U d_{1/2})^2}; \\ \delta d_{1/4} &\cong 1,1\sqrt{(\delta_{\text{сл}}K)^2 + (\delta_{\text{н1/4}}K)^2 + (\delta_U d_{1/2})^2}. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Таким образом, порядок выполнения измерений и расчета погрешностей при измерении СПО1, СПО2, средней энергии и коэффициента однородности, следующий.

1) Рассчитать среднюю энергию, СПО1, СПО2 и  $h$  согласно [1].

2) Определить  $\delta_U \bar{E}$ , зная  $\delta U_a$  (рис. 1) и погрешность  $\delta_U d_{1/2}$  (рис. 2 или 3).

3) Зная погрешности  $\delta_{\text{сл}}K$  и  $\delta_U d_{1/2}$ , по зависимостям  $\delta 1=f(\eta)$  и  $\delta 2=f(\bar{\eta})$  (рис. 9) определить коэффициенты  $\eta$  и  $\bar{\eta}$ .

4) Зная  $\eta$  и  $\bar{\eta}$ , из (21) определить  $d_1, d_2, d_3$  и  $d_4$ .

5) Измерить зависимость  $K=f(d_1, d_2, d_3, d_4)$ , по которой определить СПО1 и  $d_{1/4}$ . Вычислить СПО2 и  $h$ .

6) Зная СПО1, по зависимости (16) определить  $\bar{E}$ .

7) Проверить соблюдение неравенств (23). Если неравенства соблюдаются, погрешности  $\delta \text{СПО1}$  и  $\delta d_{1/4}$  определить по формулам (24), если не соблюдаются — по (13).

8) Зная  $\bar{E}$ , определить  $\delta(d_{1/2 \text{ Al, Cu}})$  (рис. 8); по зависимостям  $\delta \bar{E} = (d_{1/2 \text{ Al, Cu}})$  при  $\delta_0(d_{01/2 \text{ Al, Cu}}) = \text{const}$  (рис. 6 или 7) определить  $\delta \bar{E}_{0d1/2}$ .

9) Зная СПО1 и  $\delta \text{СПО1}$ , определить  $\delta \bar{E}_{d1/2}$  по зависимостям  $\delta \bar{E} = f(d_{1/2 \text{ Al, Cu}})$  (рис. 5 или 6).

10) По выражению (14) определить погрешность  $\delta \bar{E}$ .

11) По выражениям (19) определить погрешности  $\delta \text{СПО2}$  и  $\delta h$ .

При этом необходимо отметить что:

— измерения выполняют при малых значениях мощности рентгеновской трубки с целью снижения нестабильности кермы в воздухе, но при этом керма в воздухе должна быть такой, чтобы случайная погрешность при ее измерении была минимальной;

— чистота материалов дополнительных фильтров должна быть не хуже 0,999 [5, с. 16].

Экспериментальные исследования с учетом изложенных требований были проведены на РУ PANTAK HF160 [3], которая по классификации [5, табл. 4] относится к установкам с узким спектром (серия N).

Анализ полученных данных показывает, что рассчитанные значения и значения СПО1, СПО2,  $\bar{E}$  и  $h$  рентгеновского излучения, приведенные в [5, табл. 4], согласуются с результатами измерений в пределах погрешностей при их измерении и удовлетворяют тре-

бованиям, приведенным в [5], что позволяет сделать вывод о корректности расчета. При этом погрешности расчета средней энергии рентгеновского излучения и коэффициента однородности, полученные в [1], были уточнены:  $|\delta \bar{E}_{\Sigma p}| \leq 3,0\%$  и  $|\delta h_{\Sigma p}| \leq 8,0\%$  при  $0,9 \leq h < 1$ .

### Выводы

1. Погрешности при измерении коэффициента однородности, СПО1 и СПО2 определяются погрешностями при измерениях кермы в воздухе и толщины дополнительных фильтров, погрешностью аппроксимации зависимости кермы в воздухе от толщины дополнительных фильтров, нестабильностями напряжения на аноде и тока анода рентгеновской трубки и погрешностью установки напряжения на аноде.

2. Погрешность при измерении средней энергии определяется погрешностями при измерении СПО1 и коэффициента ослабления для алюминия или меди.

3. При условии, что

— случайная погрешность дозиметра рентгеновского излучения не превышает 0,5%;

— погрешность микрометра не превышает 4 мкм;

— погрешность, связанная с нестабильностями напряжения на аноде и тока анода рентгеновской трубки, и погрешность установки напряжения на аноде не превышает 1% каждая;

при правильном выборе толщины дополнительных фильтров погрешности при измерении характеристик рентгеновских установок составляют:  $|\delta \text{СПО1}_{\text{изм}}| < 3\%$ ,  $|\delta \text{СПО2}_{\text{изм}}| < 7\%$ ,  $|\delta \bar{E}_{\text{изм}}| < 2\%$  и  $|\delta h_{\text{изм}}| < 8\%$ .

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Душкин С. А., Куров А. М., Оди́нец В. А., Оробинский А. Н. Расчет характеристик рентгеновского излучения // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*.— 2008.— № 6.— С. 60—64. [Dushkin S. A., Kurov A. M., Odinets V. A., Orobinskii A. N. // *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*. 2008. N 6. P. 60]

2. Cranley K. Measurement of the performance characteristics of diagnostic X-Ray systems used in medicine. Part I. X-Ray tubes and generators (Second edition).— Belfast: Institution of physics and engineering in medicine and biology, 1996.— Report No 32.

3. Душкин С. А., Куров А. М., Оди́нец В. А., Оробинский А. Н. Исследования метрологических характеристик установки рентгеновской типа PANTAK HF160 / Тр. VI Межд. научн.-техн. конф. «Метрология и измерительная техника».— Харьков.— 2008.— Т. 2.— С. 261—265. [Dushkin S. A., Kurov A. M., Odinets V. A., Orobinskii A. N. / Tr. VI Mezhd. nauchn. tekhn. konf. «Metrologiya i izmeritel'naya tekhnika». Khar'kov. 2008. Vol. 2. P. 261]

4. Пилипенко М. І., Корнеева В. В. Перспективи забезпечення в Україні єдності вимірювань ікс-проміння в медицині // *Український радіологічний журнал*.— 2003.— № 11— С. 11—16. [Pilipenko M. I., Korneeva V. V. // *Ukrayins'kii radiologichnii zhurnal*. 2003. N 11 P. 11]

5. ДСТУ ISO 4037-1:2006. Стандартні рентгенівське та гамма-випромінювання для калібрування дозиметрів і вимірювачів потужності дози та для визначення їх чутливості в залежності від енергії фотонів. Частина 1. Характеристики випромінень та методи, що їх створюють. [DSTU ISO 40371:2006.]

6. Грановский В. А., Сирая Т. Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях.— Л.: Энергоатомиздат, 1990. [Granovskii V. A., Siraya T. N. Leningrad. Energoatomizdat. 1990]

7. ДСТУ ГОСТ 8.207:2008. ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения [DSTU GOST 8.207:2008. GSI.]

8. Немец О. Ф., Гофман Ю. В. Справочник по ядерной физике.— Киев: Наукова думка, 1975. [Nemets O. F., Gofman Yu. V. Kiev: Naukova dumka. 1975]

9. ГОСТ 25935-83. Приборы дозиметрические. Методы измерения основных параметров. [GOST 25935-83]

## АННОТАЦІЇ К СТАТТЯМ НОМЕРА

**Новий підхід до створення пристроїв з енергонезалежною пам'яттю на основі Si-MOS-транзисторів. Гуляєв Ю. В., Ждан О. Г., Чучева Г. В.**

На основі ефекту електронно-іонної взаємодії запропоновано новий підхід до створення на Si-MOS-транзисторах довгочасної перестроюваної пам'яті з довільним доступом. Різниця в рівнях сигналів «нуль» та «одиниця» залежить від режиму зчитування і може змінюватись в широких границях. Значення часу запису та стирання визначаються розмірами транзистора і складають мілісекунди. Отримані результати дають підставу вважати, що в порівнянні з традиційною кремнієвою Flash-пам'яттю такий запам'ятовуючий пристрій буде більш надійним і довговічним.

**Модельовання електротокових мікрореле. Мухуров Н. І., Єфремов Г. І., Жвавий С. П.**

За результатами моделювання запропоновано конструкцію електротокового мікрореле. Визначено розрахункові співвідношення параметрів, що описуються в нормованому вигляді функцією, що становить собою симетричну параболу. Оцінено характеристики мікрореле за різних напрямків протікання електричного струму через меандрову систему планарної конструкції.

**Вибір оптимальних параметрів деяких вузлів частотомірів НВЧ-діапазону. Криваль І. І., Скрипнюк О. І., Проценко В. О., Мар'сико А. В.**

Наведено аналіз оптимальних параметрів таких вузлів частотомірів UA ЧЗ-79М та UA ЧЗ-101, як синтезатор частоти та підсилювач проміжної частоти. Показано, що від вибору параметрів цих вузлів залежать діапазон вимірюваних частот, точність вимірювання та інші характеристики частотомірів. Приведено алгоритм роботи частотомірів в діапазоні до 40 ГГц під час вимірювання частоти синусоїдальних сигналів та несучої частоти радіоімпульсних сигналів, рекомендації щодо вибору оптимальних параметрів.

**Анізотропний термоелемент в режимі генерації ерс та струму. Анатичук Л. І., Прибила А. В.**

Розроблено комп'ютерні методи для опису властивостей анізотропного термоелемента (АТ) з урахуванням усіх необхідних модельних наближень. Знайдено конфігурації вихрових термоелектричних струмів в термоелементі, зумовлених наявністю струмових контактів. Визначено властивості АТ з урахуванням температурних залежностей властивостей матеріалів, контактних опорів і струмових контактів. Знайдено оптимальні розміри струмових контактів і місце їх розміщення. Оптимізація конструкції АТ дозволила підвищити його ККД на 15%.

**The new approach to the creation of the nonvolatile memory based on Si-MOS-transistors. Gulyaev Yu. V., Zhdan A. G., Chucheva G. V.**

A new approach to the creation of a long-term random-access memory based on the effect of the electron-ion interaction on Si-MOS-transistors is proposed. The difference in levels of signals «zero» and «unit» depends on the regime of reading, and can vary widely. Time of recording-erasing is determined by the size of the transistor and makes some milliseconds. Obtained results allow to suggest, that compared with the traditional flash memory, such storage device will be more reliable and durable.

**The electrocurrent microrelay modelling. Mukhurov N. I., Yefremov G. I., Zhvavyi S. P.**

The design and method of electrocurrent microrelay theoretical modelling is offered. It is established, that base function in the normalized kind graphically represents a symmetric parabola. Microrelay capability evaluation have been carried out for different current flow directions through the meander-line system of planar structure.

**Choosing the optimal parameters of some frequency meter's units of microwave band. Krival I. I., Skrypnuk A. I., Protsenko V. A., Maryenko A. V.**

The optimal parameters of UA ЧЗ-79М and UA ЧЗ-101 frequency meter's units such as frequency synthesizer and intermediate frequency amplifier are analysed. It is shown that the choice of these units parameters affects the measurement frequency range, accuracy and other characteristics of frequency meters. Operation algorithm of the frequency meter at frequency range up to 40 GHz with changing of sinusoidal frequency and changing carrier frequency radiopulse signals and the recommendations for choosing the optimal parameters are given.

**Anisotropic thermoelement in emf and current generation mode. Anatychuk L. I., Prybyla A. V.**

Computer methods for the description of the anisotropic thermoelement (AT) properties with regard to all necessary model approximations have been elaborated. Configurations of eddy thermoelectric currents in the anisotropic thermoelement caused by current contacts have been found. The properties of the AT with regard to temperature dependences of material properties, contact resistances and current contacts have been determined for concrete cases. Optimal dimensions of current contacts have been found. The optimization of AT construction allowed to increase its efficiency by 15%.

**Швидкісні рівняння екситонного лазера.**  
**Гаркавенко О. С.**

Отримано швидкісні рівняння екситонного лазера в системі взаємодіючих екситонів та виведено умови інверсної населеності, генерації. Показано принципово нову можливість створення гамма-лазера.

**Індуктивний негасенсор.** **Войцеховська О. В., Ліщинська Л. Б., Лазарєв О. О.**

Розроблено схему індуктивного мостового негасенсора на  $L$ -негатроні — пристрої з негативною диференціальною індуктивністю. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження показали, що введення негатрону до схеми індуктивного мостового сенсора дає вигоду у чутливості утричі. Розроблено макет, у якому реалізовано можливість одночасного дослідження індуктивного сенсора та негасенсора на  $L$ -негатроні.

**Розробка конструкції та технології виготовлення комплементарних транзисторів для радіаційно стійких ІС.** **Горбань А. Н., Кравчина В. В.**

Розроблено конструкцію вертикальних комплементарних транзисторів з повною діелектричною ізоляцією, розроблено нові технологічні процеси створення на їх основі радіаційно стійких ІС з параметрами, які забезпечують низькі значення струму витoku поряд із значними величинами прямого струму і пробивної напруги при частоті обміну сигналів інформації на рівні 500 кГц.

**Кремнієвий  $p-i-n$ -фотодіод з малим темновим струмом.** **Добровольський Ю. Г., Ащеулов А. А.**

Досліджено вплив кільцевої металізації зворотної сторони кристала  $p-i-n$ -фотодіода на основі високоомного кремнію на його характеристики. Темновий струм можна зменшити на порядок, при цьому втрати струмової монохроматичної чутливості на довжині хвилі 1,06 мкм не перевищують 15%. Характеристики запропонованого фотодіода показують, що він може бути рекомендований як базова конструкція при розробці серійних виробів.

**Теплотехнічні характеристики радіатора для ефективних систем охолодження радіоелектронної техніки.** **Руденко А. И., Кравець В. Ю., Зарипов В. К.**

Наведено результати дослідження теплопередаючих характеристик радіатора на основі теплової труби для охолодження елементів персональних комп'ютерів. Встановлено, що при щільності теплового потоку  $q < 4 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> як теплоносії краще використовувати ацетон чи етанол, при  $q > 4 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> — воду. Показано, що запропоновані радіатори значно ефективніші від радіаторів традиційної конструкції з плоскою теплообмінною поверхнею з прямолінійними пластинчастими ребрами.

**Exciton laser rate equations.**  
**Garkavenko A. S.**

The rate equations of the exciton laser in the system of interacting excitons have been obtained and the inverted population conditions and generation have been derived. The possibility of creating radically new gamma-ray laser has been shown.

**Inductive negasensor.** **Voytschekhovskaya Ye. V., Lishchynska L. B., Lazarev A. A.**

A circuit of an inductive bridge negasensor on a  $L$ -negatron device with negative differential inductance is developed. Theoretical and experimental researches which were conducted have shown that introduction of negatron to the circuit of inductive bridge sensor gives three times sensitivity advantage. A model of inductive sensor and negasensor on a  $L$ -negatron is developed. Possibility of simultaneous research for sensor and negasensor is realized in this model.

**Development of a construction and manufacturing techniques of complementary transistors for the radiation tolerant integrated circuits.** **Gorban A. N., Kravchina V. V.**

The construction of vertical complementary transistors with the full dielectric isolation is developed, new technological processes of creation on their basis the radiation tolerant integrated circuits with parameters which provide low values of a leakage current along with the considerable values of a forward current and breakdown voltage at the information signals exchange frequency of about 500 kHz are developed.

**Silicic  $p-i-n$ -photodiode with small dark current.** **Dobrovolskiy Yu. G. Ashcheulov A. A.**

The influence of circular metallization of the reverse side of  $p-i-n$ -photodiode crystal based on highly ohm silicon on its characteristics are explored. The dark current can be decreased by an order, at the same time losses of current monochromatic sensitiveness on a wave-length 1,06 mkm do not exceed 15%. The characteristics of the offered photodiode show that it can be recommended as base construction at serial product designing.

**Heat engineering characteristics of the radiator for effective electronic equipment cooling systems.** **Rudenko A. I., Kravetz V. Yu., Zaripov V. K.**

The article presents the results of heat transfer characteristics research of the radiator on basis of a heat pipe for cooling of personal computer elements. It is determined that using acetone and ethanol as heat carriers under heat flow density  $q < 4 \cdot 10^4$  W/m<sup>2</sup> and water under  $q > 4 \cdot 10^4$  W/m<sup>2</sup> is preferable. It is shown that the introduced radiators are considerably more effective than the radiators of conventional design with flat heat exchange surface with a rectangle plate fin.



**Лазерна абляція та фотостимульована пасивація поверхні кристалів  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ . Загоруйко Ю. А., Коваленко Н. О., Христ'ян В. А., Федоренко О. О., Герасименко А. С., Добротворська М. В., Матейченко П. В.**

Запропоновано новий фізичний метод пасивації  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  детекторів — обробка поверхні кристала за допомогою лазерної абляції (ЛА) з подальшою фотостимульованою пасивацією (ФСП), при якому утворення на поверхні зразка високоомного оксидного шару відбувається після очищення його поверхні під дією інтенсивного світлового опромінення. Показано, що метод ЛА+ФСП є технологічним і в порівнянні із розробленими раніше методами ФСП і ФЕП забезпечує отримання більш товстих, однорідних і високоомних оксидних плівок, що істотно збільшує поверхневий електроопір зразків  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  і зменшує у них струми витоку.

**Високочутлива установка для оцінки зміни показника заломлення водних розчинів. Підкамінь Л. Й., Гавриляк М. С.**

Представлено результати розробки автоматизованої високочутливої оптикоелектронної установки для оцінки зміни показника заломлення водних розчинів з точністю до  $10^{-7}$ . Приведено методичні рекомендації по її використанню, показано ефективність та доцільність використання установки.

**Нове технологічне обладнання для інноваційних технологій мікро-, нано- та радіоелектроніки. Одиноків В. В., Павлов Г. Я.**

Представлено нові розробки — комплекти вакуумно-плазмового і фізико-термічного технологічного обладнання мікро-, нано-, радіоелектроніки для технічного навчання, наукових досліджень, відпрацювання технологічних процесів, а також для забезпечення дрібносерійного виробництва на підприємствах малого та середнього бізнесу.

**Похибки при вимірюванні характеристик рентгенівських установок. Душкін С. О., Іванський В. Б., Куров О. М., Одінець В. О., Оробінський А. Н.**

Наведено вирази для розрахунку похибок при вимірюванні характеристик рентгенівських установок: середньої енергії, коефіцієнта гомогенності, першого та другого шару половинного послаблення (ШПО1, ШПО2). Проведено порівняння похибок при вимірюванні та розрахунку характеристик рентгенівської установки з вимогами до похибок характеристик стандартного рентгенівського випромінювання з вузьким спектром згідно ДСТУ ISO 4037-1:2006. Визначено критерії вибору товщини додаткових фільтрів для вимірювання ШПП1 та ШПП2. Уточнено похибки при розрахунку середньої енергії рентгенівського випромінювання та коефіцієнта гомогенності.

**Laser ablation and photostimulated passivation of the surface of  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  crystals. Zagoruiko Yu. A., Kovalenko N. O., Khristyan V. A., Fedorenko O. A., Gerasimenko A. S., Dobrotvorskaya M. V., Mateychenko P. V.**

A new physical method of  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ -detectors passivation is proposed — the treatment of crystal surface by a laser ablation (LA) with subsequent photostimulated passivation (PhSP), during which a high-resistance oxide layer is formed on its surface after the surface cleaning under intensive light irradiation effect. It is shown that the method of LA+PhSP is manufacturable and in comparison with PhSP and PhESP methods developed earlier provides a thick, homogeneous and high-oxide films, which significantly increases the surface resistivity of  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  samples and reduces leakage currents in them.

**High-sensitivity setup for estimation of water solutions refraction index change. Podkamen L. I., Gavrylyak M. S.**

The automated high-sensitivity setup for estimation of change of water solutions refraction index with accurate within  $10^{-7}$  is developed. The methodical recommendations on its use are listed, the efficiency and appropriateness of the setup are shown.

**New technological equipment for the innovative technologies of micro-, nano- and radio electronics. Odinokov V. V. Pavlov, G. Ya.**

Some new developments are presented — vacuum-plasma and physics-thermal processing equipment kits for micro-, nano- and radio electronics for technical training, research, technological process development, as well as for small-scale production in small and medium-sized businesses.

**The measurement errors of X-ray devices features. Dushkin S. A., Ivanskiy V. B., Kurov A. M., Odinets V. A., Orobinskiy A. N.**

Expressions for calculating the measurement errors of X-ray devices features are given as follows: mean photon energy, homogeneity coefficient, the first and the second half-value layer (1<sup>st</sup> HVL, 2<sup>nd</sup> HVL). Comparison of errors is organized at measurement and calculation of features of X-ray installation with requirements to errors of standard X-ray radiation features with narrow spectrum on DSTU ISO 4037-1:2006. Criteria of choosing the additional filters thickness for measurement 1<sup>st</sup> HVL and 2<sup>nd</sup> HVL are defined. The errors resulting from calculation of mean photon energy of X-ray radiation and homogeneity coefficient are specified.

# ПАМЯТКА АВТОРУ ЖУРНАЛА «ТКЭА»

1. Рукопись должна соответствовать тематике журнала и отличаться прикладной направленностью. Если результаты получены в смежных областях знаний, необходимо показать их применимость в области интересов журнала.

2. При оценке рукописи редакцию будут интересовать следующие аспекты:

- актуальность темы;
- обоснованность постановки задачи;
- новизна информации (в сравнении с работами предшественников);
- убедительность доказательств;
- правомерность выводов;
- возможность практического применения;
- целесообразность (и адекватность тексту) таблиц, иллюстраций, списка использованных источников;

— строгость терминологии;

— композиция рукописи, в т. ч. оправданность объема.

3. Название рукописи должно быть конкретным и, в то же время, по возможности кратким.

4. Обозначьте разделы рукописи. Выделите выводы (резюме, заключение). Кстати, проверьте себя — насколько согласуются между собой поставленная задача, выводы и название статьи.

5. Единицы измерения всех величин должны отвечать современным требованиям, а использованные символы (и аббревиатуры) должны быть пояснены при первом их употреблении в тексте.

6. При ссылке в тексте на численные значения, формулы и иные фактические данные, заимствованные из книг, следует (для удобства поиска) указывать не только саму книгу, но и страницу (например, [2, с. 418]).

7. Список «Использованные источники» формируется в порядке их упоминания в тексте. Желательно избегать ссылок на труднодоступные источники (например, на материалы конференций) или на недолговечные (например, Интернет). Принятое в журнале описание источников показано в приложении.

8. Сопроводите рукопись библиографической карточкой на украинском (для авторов из Украины), русском и английском языках с аннотацией до 500 печатных знаков. Укажите ключевые слова, а также индекс рукописи по Универсальной десятичной классификации (УДК).

9. Материалы статьи направляйте по адресу <tkea@optima.com.ua>. Если Вы направляете рукопись по почте, приложите запись статьи на CD.

Текст статьи на русском языке набирается в текстовом редакторе Microsoft Word размером 12, без переносов, с одним пробелом между словами, с междустрочным интервалом не менее 1,5. Правый край текста выравнивать не обязательно.

Допускается использование программы Equation только в тех случаях, когда Word бессилен, например при наборе специальных знаков над буквенными обозначениями, подкоренных выражений, пределов интегрирования, суммирования и т. п.

С точки зрения удобства верстки желательно, чтобы объем иллюстраций не превышал 40% от общего объема статьи. Иллюстрации должны быть представлены отдельными файлами. Графики и чертежи следует выполнять в черно-белом (битовом) режиме.

При подготовке цветных иллюстраций желательно фотографировать объекты на однотонном фоне цифровой камерой. Если проводится сканирование изображений, то его необходимо выполнять с разрешением 300 ppi.

10. Снабдите рукопись сведениями об авторах (фамилия, имя, отчество, ученая степень, место работы, должностное положение, дата рождения, служебный и домашний адреса с указанием почтового индекса, e-mail, телефон, телефакс).

11. Если считаете необходимым, сопроводите статью экспертным заключением о возможности ее публикации в открытой печати.



**1—3 НОЯБРЯ 2011**  
**МОСКВА, ЭКСПОЦЕНТР**

**РОССИЙСКАЯ**  
**НЕДЕЛЯ**  
**ЭЛЕКТРОНИКИ**



**ChipEXPO-2011**

**ПРОМЫШЛЕННАЯ  
И ВСТРАИВАЕМАЯ  
ЭЛЕКТРОНИКА 2011**

**ПРОИЗВОДСТВО  
ЭЛЕКТРОНИКИ**

**MOBILE &  
WIRELESS**

**ПОТЕНЦИАЛ-2011**

**КОМПОНЕНТЫ  
И ТЕХНОЛОГИИ**

**СОВРЕМЕННАЯ  
ЭЛЕКТРОНИКА**

**ЭЛЕКТРОНИКА**

**электроника**  
инфо медиа группа

**РАДИО**

Інформаційна  
підтримка  
в УКРАЇНІ

**CHIP  
NEWS**

**ПРИГЛАШЕНИЯ:**

**[www.russianelectronicweek.ru](http://www.russianelectronicweek.ru)**

*Номер готовили  
Алчевск, Винница, Запорожье, Зеленоград,  
Киев, Минск, Москва, Одесса, Фрязино,  
Харьков, Черновцы, Штутгарт.*



Пишите  
Подписывайтесь  
Читайте