

# ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ

ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ  
МЕЖДУНАРОДНАЯ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ



## СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

27— 31 мая 2013 года  
Украина, г. Одесса

Реквизиты для связи  
e-mail <tkea@optima.com.ua>  
тел. +38 (048) 728-49-46,  
728-18-50.

- Информационные системы и технологии
- Компьютерные системы и компоненты
- Системы и средства искусственного интеллекта
- Защита информации в широкополосных системах и компьютерных сетях
- Радиотехнические, телекоммуникационные и телевизионные системы
- Проектирование, конструирование, производство и контроль электронных средств
- Функциональная электроника. Микро- и нанотехнологии

С текущей информацией  
можно ознакомиться на сайте  
[www.tkea.com.ua/siet/inf.html](http://www.tkea.com.ua/siet/inf.html)

# 1 2013

ЯНВАРЬ — ФЕВРАЛЬ

## НОВОЕ О СТАТУСЕ ЖУРНАЛА

Журнал «ТКЭА» включен в наукометрическую базу РИНЦ научной электронной библиотеки России.

Для соискателей ученых степеней из Украины дополнительно сообщаем, что статьи, опубликованные в журналах «ТКЭА» и «ТП СВЧ», приравниваются к иностранным публикациям, как это предусмотрено в Приказе МОН Украины № 1112 от 17.10.2012.

В дополнение к письму МОН (см. 3-ю стр. обложки) подтверждено включение журнала «ТКЭА» в Перечень научных специальных изданий Украины не только в раздел технических наук, но и в раздел физико-математических (физических) наук.



## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ «ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ»

ISSN 2225-5818

Выходит один раз в 2 месяца

Регистрационный номер KB 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).

Включен в базы данных DOAJ и РИНЦ

### 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,

тел./факс 728-49-46.

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

А. А. Алексеева, М. Г. Глава, Н. М. Колганова.

Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корещая.

Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.

Подписано к печати 18.02.2013. Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.

Печ. л. 7,0+1,0. Уч.-изд. л. 9,0. Тираж 250 экз. Заказ № 50.

Издательство «Политехперіодика»

(65044, г. Одесса-44, а/я 17).

Отпечатано в типографии РА «ART-V»

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



Номер выпущен при поддержке  
НПП «Сатурн», (г. Киев)  
ЧАО «Укрналит» (г. Киев),  
НПП «Карат» (г. Львов),  
ЦКБ «Ритм» (г. Черновцы)



**ТЕХНОЛОГИЯ  
И  
КОНСТРУИРОВАНИЕ  
В  
ЭЛЕКТРОННОЙ  
АППАРАТУРЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2013

№ 1

Год издания 37-й

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

*К.т.н. В. М. Чмиль*

**СОДЕРЖАНИЕ**

**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. Кончиц* (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)  
*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. Рухтин* (г. Черновцы)  
*Д.ф.-м.н. М. И. Самойлович* (г. Москва)  
*Д.т.н. В. С. Ситников* (г. Одесса)  
*Д. т. н. Я. Стеванович* (г. Белград)  
*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**

МПП Украины  
Институт физики полупроводников  
им. В. Е. Лашкарёва  
Научно-производственное  
предприятие «Сатурн»  
Одесский национальный  
политехнический университет  
Издательство "Политехперіодика"

Одобрено к печати Ученым советом  
ОНПУ  
(Протокол № 4 от 18.02 2013 г.)

**Функциональная микро- и наноэлектроника**

Модуляционная поляриметрия полного внутреннего отражения, нарушенного алмазоподобными пленками. *Максименко Л. С., Мищук О. Н., Матяш И. Е., Сердега Б. К., Костин Е. Г., Полозов Б. П., Федорович О. А., Савинков Г. К.* 3

Исследование процесса формирования токовых характеристик кремниевого фотодиода с выпрямляющими барьерами. *Каримов А. В., Ёдгорова Д. М., Гиясова Ф. А., Мирджалилова М. А., Асанова Г. О., Абдулхаев О. А., Мухутдинов Ж. Ф.* 9

**СВЧ-техника**

Малошумящие усилители на основе SiGe-HBT для сверхширокополосных систем. *Попов В. П., Сидоренко В. П.* 13

**Обеспечение тепловых режимов**

Система отвода теплоты от теплонагруженных элементов РЭА на основе пульсационной тепловой трубы. *Алексеик Е. С., Кравец В. Ю.* 19

**Технологические процессы и оборудование**

Технология изготовления контактов к карбиду кремния. *Кудрик Я. Я., Бигун Р. И., Кудрик Р. Я.* 25

Технология изготовления гибких терморезисторов на полиимидной основе. *Динев Д. А., Жора В. Д., Григорьева Н. Н., Грунянская В. П.* 38

Особенности изготовления  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ -детектора ионизирующего излучения. *Томашик З. Ф., Стратийчук И. Б., Томашик В. Н., Будзуляк С. И., Гнатив И. И., Комар В. К., Дубина Н. Г., Лоцько А. П., Корбутяк Д. В., Демчина Л. А., Вахняк Н. Д.* 42

**Материалы электроники**

Электрические свойства анизотипных гетеропереходов  $n-TiO_2:Mn/p-CdTe$ . *Мостовой А. И., Брус В. В., Марьянчук П. Д., Ульяницкий К. С.* 45

**Указатель статей, опубликованных в журнале в 2012 г.** 49

**Список рецензентов номера** 51

**Новые книги** 12, 41

## ЗМІСТ

**Функціональна мікро- та наноелектроніка**

Модуляційна поляриметрія повного внутрішнього відбиття, порушеного алмазоподібними плівками. Максименко Л. С., Мищук О. Н., Матяш І. Е., Сердега Б. К., Костін Є. Г., Полозов Б. П., Федорович О. А., Савінков Г. К. (3)

Дослідження процесу формування струмових характеристик кремнієвого фотодіода з випрямляючими бар'єрами. Карімов А. В., Йодгорова Д. М., Гіасова Ф. А., Мірджалілова М. А., Асанова Г. О., Абдулхаев О. А., Мухутдінов Ж. Ф. (9)

**НВЧ-техніка**

Малощумливі підсилювачі на основі SiGe-HBT для надширокопasmових систем. Попов В. П., Сидоренко В. П. (13)

**Забезпечення теплових режимів**

Система відводу теплоти від теплонавантажених елементів РЕА на основі пульсаційної теплової труби. Алексеїк Є. С., Кравець В. Ю. (19)

**Технологічні процеси та обладнання**

Технологія виготовлення контактів до карбіду кремнію. Кудрик Я. Я., Бігун Р. І., Кудрик Р. Я. (25)

Технологія виготовлення гнучких терморезисторів на поліімідній основі. Дінев Д. А., Жора В. Д., Григор'єва Н. М., Грунянська В. П. (38)

Особливості виготовлення  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ -детектора іонізуючого випромінювання. Томашик З. Ф., Стратійчук І. Б., Томашик В. М., Будзуляк С. І., Гнатів І. І., Комар В. К., Дубина Н. Г., Лоцько А. П., Корбутяк Д. В., Демчин Л. А., Вахняк Н. Д. (42)

**Матеріали електроніки**

Електричні властивості анізотипних гетеропереходів  $n\text{-TiO}_2\text{:Mn}/p\text{-CdTe}$ . Мостовий А. І., Брус В. В., Мар'янчук П. Д., Уль'яницький К. С. (45)

## CONTENTS

**Functional micro- and nanoelectronics**

Modulation polarimetry of full internal reflection, broken by diamond-like films. Maksimenko L. S., Mishchuk O. N., Matyash I. E., Serdega B. K., Kostin E. G., Polozov B. P., Fedorovich O. A., Savinkov G. K. (3)

Study on the formation of current characteristics of a silicon photodiode with rectifying barriers. Karimov A. V., Yodgorova D. M., Giasova F. A., Mirdzhailova M. A., Asanova G. O., Abdulkhaev O. A., Mukhutdinov Zh. F. (9)

**Microwave technology**

SiGe HBT low noise amplifiers for ultra-wideband systems. Popov V. P., Sidorenko V. P. (13)

**Ensuring of thermal modes**

Oscillating heat pipe cooler for heat-generating elements of electronics. Aleksei E. S., Kravets V. Yu. (19)

**Technological processes and equipment**

Manufacturing technology for contacts to silicon carbide. Kudryk Ya. Ya., Bigun R. I., Kudryk R. Ya. (25)

Manufacturing technology for flexible thermoresistors on polyimide base. Dinev D. A., Zhora V. D., Grigoryeva N. N., Grunyanyskaya V. P. (38)

Features of manufacturing  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  ionizing radiation detector. Tomashik Z. F., Stratiichuk I. B., Tomashik V. N., Budzulyak S. I., Gnativ I. I., Komar V. K., Dubina N. G., Lots'ko A. P., Korbutyak D. V., Demchina L. A., Vakhnyak N. D. (42)

**Materials of electronics**

Electrical properties anisotype heterojunctions  $n\text{-TiO}_2\text{:Mn}/p\text{-CdTe}$ . Mostovyi A. I., Brus V. V., Maryanchuk P. D., Ulyanitskii K. S. (45)

УДК 535.5

Л. С. МАКСИМЕНКО<sup>1</sup>, к. ф.-м. н. О. Н. МИЩУК<sup>1</sup>, к. ф.-м. н. И. Е. МАТЯШ<sup>1</sup>, д. ф.-м. н. Б. К. СЕРДЕГА<sup>1</sup>, Е. Г. КОСТИН<sup>2</sup>, Б. П. ПОЛОЗОВ<sup>2</sup>, к. ф.-м. н. О. А. ФЕДОРОВИЧ<sup>2</sup>, Г. К. САВИНКОВ<sup>3</sup>

Украина, г. Киев, <sup>1</sup>Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ,

<sup>2</sup>Институт ядерных исследований НАНУ, <sup>3</sup>НТЦ «Криптон»

E-mail: i\_matyash@ukr.net, oafedorovich@kinr.kiev.ua, krypton-ua@ukr.net

## МОДУЛЯЦИОННАЯ ПОЛЯРИМЕТРИЯ ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ, НАРУШЕННОГО АЛМАЗОПОДОБНЫМИ ПЛЕНКАМИ

*Исследованы алмазоподобные пленки, специально приготовленные при различных технологических условиях. Введен параметр  $\rho$ , называемый поляризационной разностью. Из спектральных характеристик параметра  $\rho$  обнаружено, что взаимодействие электромагнитного излучения с электронной системой образцов, которое происходит в используемом спектральном диапазоне, состоит из двух поверхностных резонансов — локального и поляритонного, различающихся частотой и временем релаксации. Сделан вывод о том, что соотношение амплитуд резонансов определяется структурными свойствами образцов, что свидетельствует о перспективности метода модуляционной поляриметрии для диагностики структурной однородности композитных нанокластерных пленок.*

**Ключевые слова:** алмазоподобные пленки, модуляционная поляриметрия, композитные нанокластерные пленки.

Современная нанофизика твердого тела оперирует большим количеством разнообразных материалов на основе металлов, диэлектриков, металлодиэлектрических и металлических композитов, но особое внимание уделяется углеродным материалам. Это графены, фуллерены, нанотрубки, алмазные и алмазоподобные пленки (АПП) [1, 2]. Интерес к этим материалам, получаемым в виде наноразмерных пленок, объясняется их нетривиальными физическими свойствами, что послужило стимулом для создания более десяти технологических приемов изготовления наноматериалов: дуговым методом [3]; электроразрядной обработкой органических материалов [4]; высокочастотными [5], СВЧ [6] и тлеющим разрядами [7]; а также разрядно-импульсными методами [8], детонационными, лазерными, электронными пучками, каталитическим пиролизом [9] и др. Это, в свою очередь, потребовало развития новых методов исследования широкого спектра свойств материалов — от механических до квантовых. Наиболее распространенным из них является метод атомно-силовой микроскопии (АСМ), и хотя его возможности ограничиваются определением лишь топологических характеристик исследуемых объектов, он остается одним из самых популярных.

Наряду с этим, изготовители наноматериалов нуждаются в диагностике их физических свойств, оперативное использование которых при корректировке параметров технологических процессов способствует конструированию материалов с заданными свойствами. Методы исследования свойств наноразмерных объектов, основанные на регистрации эффектов, зависящих от состояния поляризации электромагнитного излучения, вы-

деляются из множества других, прежде всего, своим неразрушающим действием. Использование для регистрации таких эффектов техники модуляционной поляриметрии (МП) [10] повышает как чувствительность, так и информационную способность методики, что, в свою очередь, позволяет получать новые сведения об объекте исследования. Среди поляризационных эффектов наиболее информативным с точки зрения свойств наноструктурированной пленки является поверхностный плазмонный резонанс (ППР), регистрация которого осуществляется, в частности, в условиях внутреннего отражения излучения. Целью настоящей работы является исследование алмазоподобных пленок с помощью техники модуляционной поляриметрии нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Дополнительным стимулом для проведения исследований является тот факт, что явление ППР, которое ярко выражено и хорошо изучено в металлических средах (Au, Cu, Al, Ag), с помощью отмеченной методики поддается достоверной регистрации практически во всех частично проводящих средах. Это подтверждается публикациями, в которых говорится о наблюдении ППР в металлооксидных пленках, например [11].

### Методика эксперимента

Пленки для исследований были получены из газовой фазы на специальной установке «Алмаз», разработанной и изготовленной в Институте ядерных исследований НАНУ. Они осаждались из плазмы высокочастотного разряда (13,56 МГц), которая возбуждалась в смеси  $\text{H}_2 + (1 - 5)\% \text{CH}_4$  в скрещенном управляемом маг-

нитном поле. Рабочее давление в камере варьировалось в пределах  $10^{-1} - 10^{-2}$  Торр. Прокачку камеры проводили до давления  $10^{-3}$  Торр при помощи двухкамерного форвакуумного насоса, включенного последовательно с насосом Рутса. Контролируемое заполнение камеры газом осуществляла система напуска газа СНА-2. Ток в разряде составлял 4–8 А при мощности генератора до 1 кВт. Для согласования генератора с меняющимся сопротивлением разряда использовали согласующее устройство. Напряжение смещения на подложкодержателе диаметром 110 мм регулировали от –140 до +390 В с помощью дополнительного источника напряжения. В процессе исследований использовали специально разработанный регулируемый источник постоянного тока с фильтрами, блокирующими проникновение в него ВЧ-напряжения. Разогревом молибденовой спирали устанавливали температуру подложкодержателя  $T_{\text{пл}}$  в диапазоне 700–1000°C, которую в отсутствие разряда измеряли хромель-алюмелевой термопарой и оптическим пирометром ОППИР-09.

В качестве подложек использовали полированные пластинки из кварцевого стекла. Пластины толщиной 1 мм, дополняя сегмент из того же материала, составляли полуцилиндр, в котором происходит полное внутреннее отражение. Контакт пластины и сегмента для исключения интерференции на зазоре осуществлялся с помощью иммерсионной жидкости (глицерина), оптические свойства которой близки к свойствам кварцевого стекла. Время напыления пленок составляло от 2 до 5 часов для разных образцов. Остальные параметры процесса напыления указаны в **таблице**.

Исследование образца 1 методом АСМ показало, что пленка толщиной 280 нм состоит из кластеров, средний размер которых составляет около 40 нм. Поверхность пленки образца 2 в виде фазовой топологии показана на **рис. 1**. Ее шероховатость – менее 10 нм, что позволяет считать пленку однородной.

Оптические свойства пленок исследовали методом внутреннего отражения, в котором регистрировали коэффициенты отражения линейно

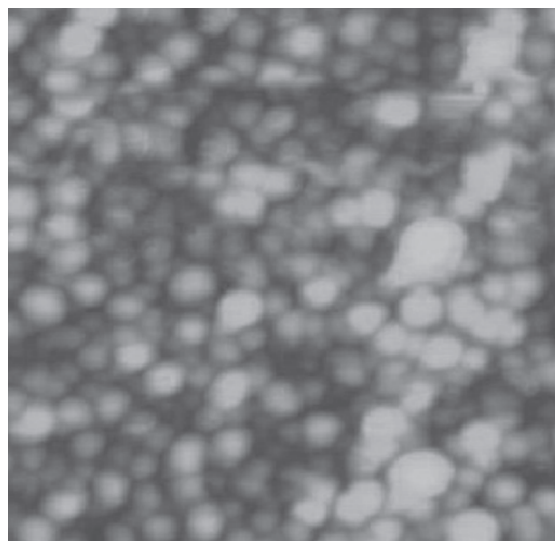


Рис. 1. Фазовая АСМ-топология образца 2

поляризованного излучения. Описание оптической схемы установки и ее функционирование подробно изложены в [12]. Здесь же только отметим, что методу НПВО присущ признак дифференцирования. Суть дифференцирования, изложенная в [13], заключается в том, что степень взаимодействия электромагнитной волны с пленкой на поверхности полуцилиндра определяется состоянием поляризации излучения. Так, это взаимодействие более существенно, когда поле волны имеет компоненту, перпендикулярную поверхности (*p*-поляризация), и менее существенно, когда компонента параллельна поверхности полуцилиндра (*s*-поляризация). Что же касается физического дифференцирования, то его техника построена на использовании модулятора поляризации – оптического элемента, роль которого заключается в управлении состоянием поляризации излучения (например, азимутом компоненты поля волны) без изменения всех остальных его параметров. Такому определению лучше всего соответствует конструкция, описанная в [14] и функционирующая так, что электрическое поле прошедшей сквозь оптический элемент волны периодически (с частотой 50 кГц)

Параметры процесса напыления алмазоподобных пленок на кварцевые пластинки

№ образца	Объемный состав газовой смеси, %	Давление газа в реакторе, $10^{-2}$ Торр	$T_{\text{пл}}$ , °C	Ток в разряде, А	Напряжение смещения, В	Время напыления, ч
1	H <sub>2</sub> =19, CH <sub>4</sub> =2, Ar=79	6	780	4,0	+100	5
2	H <sub>2</sub> =9, CH <sub>4</sub> =2, Ar=89	5			+110	3,5
3	H <sub>2</sub> =98, CH <sub>4</sub> =2	8			+140	5
4	H <sub>2</sub> =98, CH <sub>4</sub> =2	8			+80	2



становится параллельным или перпендикулярным плоскости падения. После взаимодействия с исследуемой пленкой на рабочей поверхности полуцилиндра отраженное излучение преобразуется фотодетектором (Ge-фотодиодом) в электрический сигнал. Поскольку в общем случае значения коэффициентов отражения излучений  $p$ -поляризованной ( $R_p^2$ ) и  $s$ -поляризованной ( $R_s^2$ ) волны различаются, токовый сигнал фотодетектора, измеряемый селективным вольтметром с синхронно-фазовым детектором на частоте модуляции, пропорционален их разности:  $I \sim (R_s^2 - R_p^2)$ . В этом же варианте конструкции для измерения интенсивности излучения нужной поляризации перед фотодетектором устанавливается линейный поляризатор, ориентированный на его пропускание. Нормирование каждого из перечисленных трех сигналов фотодетектора позволяло получать абсолютные значения всех трех параметров, входящих в соотношение  $\rho = R_s^2 - R_p^2$ .

Таким образом, измерялись коэффициенты отражения  $R_s^2$  и  $R_p^2$ , а также поляризационная разность  $\rho$  в зависимости от угла падения  $\theta$  и длины волны  $\lambda$  сканирующего излучения. При измерении угловых характеристик источниками линейно поляризованного излучения служил гелий-неоновый лазер с длиной волны  $\lambda = 632$  нм, а при регистрации спектральных зависимостей — монохроматор МДР-4 с галогенной лампой на входе и поляризатором на выходе.

### Результаты и их обсуждение

Анализ результатов исследований начнем с образца 4, поляризационные угловые характеристики которого, представленные на **рис. 2**, объясняются наиболее просто. Подобное поведение, а именно — приближающиеся к единице коэффициенты  $R_s^2$  и  $R_p^2$  и к нулю их разность  $\rho$  при углах больше критического  $\theta_{cr}$ , присуще, во-первых, слабо поглощающим, а во-вторых, ультратонким пленкам.

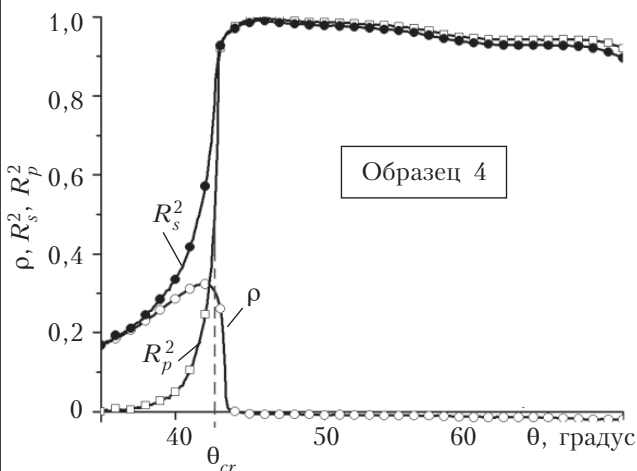


Рис. 2. Зависимости коэффициентов отражения  $R_s^2$ ,  $R_p^2$  и их разности  $\rho$  от угла  $\theta$  для образца 4 при  $\lambda = 632$  нм

Более интересными с точки зрения обнаружительной способности модуляционной поляриметрии представляются остальные образцы вследствие их структурных особенностей. Их поляризационные угловые характеристики приведены на **рис. 3**. Несмотря на имеющиеся различия в форме кривых, можно выделить общие тенденции в поведении характеристик отражения  $p$ - и  $s$ -поляризованного излучения. Как видно, излучение обеих поляризаций резонансно взаи-

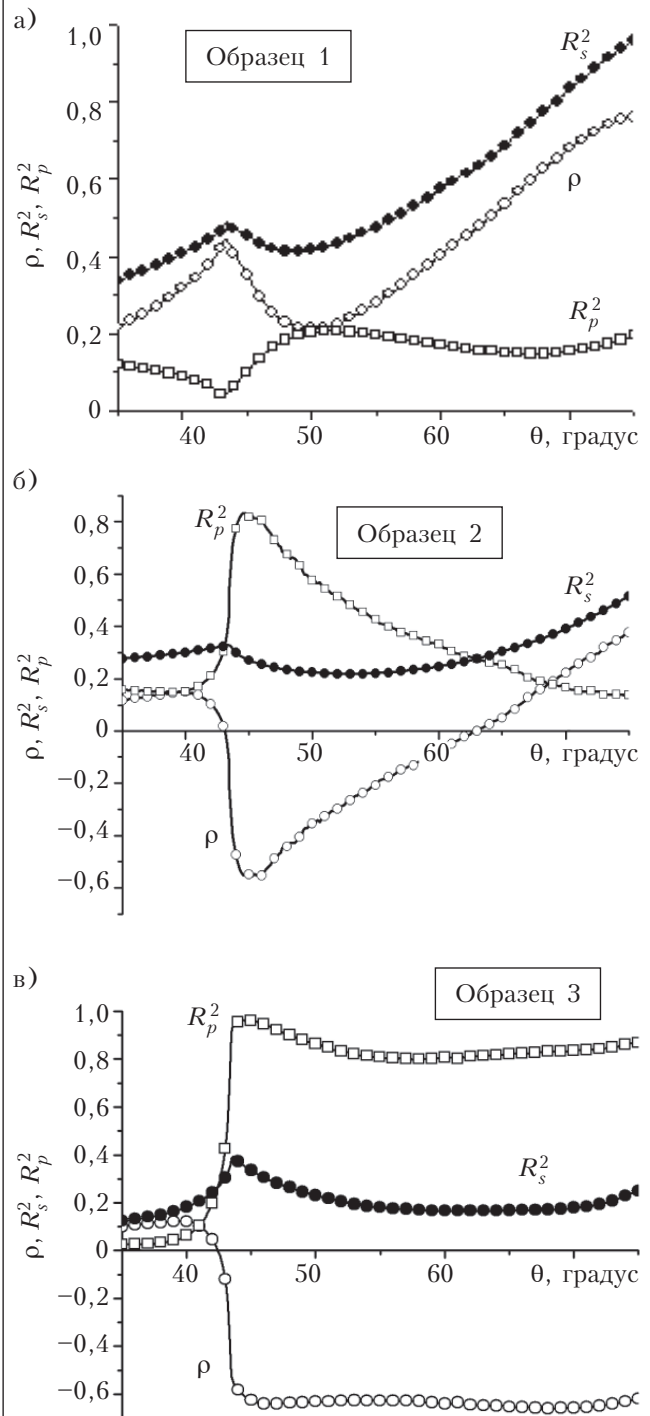


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, для образцов 1, 2 и 3

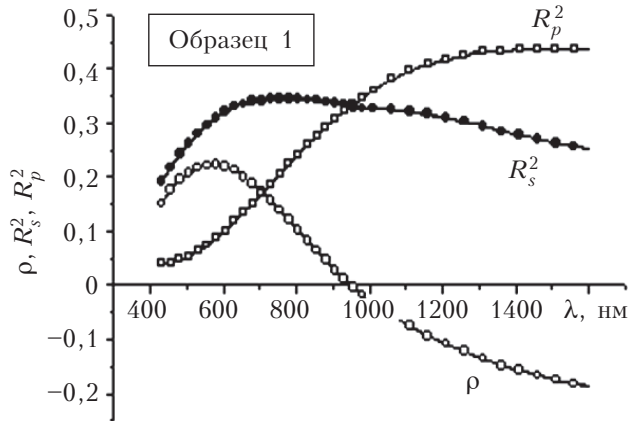


Рис. 4. Спектральная зависимость коэффициентов отражения  $R_s^2$ ,  $R_p^2$  и их разности  $\rho$  при  $\theta=50^\circ$

модельствует с алмазоподобными пленками в большом угловом диапазоне, о чем свидетельствуют значительные по амплитуде и расширенные по углу провалы на кривых зависимостей при углах больше критического. Такой механизм взаимодействия возможен в случае когда пленка обладает кластерной структурой, а частицы имеют форму, близкую к сферической. Именно в этом случае условие возникновения плазмонного резонанса может выполняться в расширенном диапазоне углов, больших критического [15].

Обращает на себя внимание значительная по величине и протяженная по углу отрицательная часть кривой зависимости поляризационной разности от  $\theta$  для образцов 2 и 3 (рис. 3, б, в). Такое поведение поляризационной разности определяется «аномальным» отражением (следствие того, что  $R_s^2 < R_p^2$ ) и также однозначно характеризует пленку как обладающую конечной величиной коэффициента поглощения. О кластерной структуре пленки свидетельствует форма кривой зависимости  $\rho(\theta)$  ниже оси абсцисс, причем знак ее наклона определяется преобладанием в резонансном взаимодействии излучения с тем или иным состоянием поляризации [16]. Положительный наклон кривой, т. е. возрастающий характер зависимости (рис. 3, б), свидетельствует о доминировании  $p$ -поляризованного излучения в резонансном механизме взаимодействия, а практически горизонтальная зависимость (рис. 3, в) — о соизмеримых вкладах  $p$ - и  $s$ -поляризованного излучения.

Форма характеристики поляризационной разности образца 1 более сложная (рис. 3, а). Это связано с тем, что механизм резонансного взаимодействия пленки с излучением не единственный, к тому же, в разных механизмах возбуждения плазмонов доминируют излучения с разными состояниями поляризации. Свидетельством тому является спектральная характеристика  $\rho(\lambda)$  этого же образца, измеренная в диа-

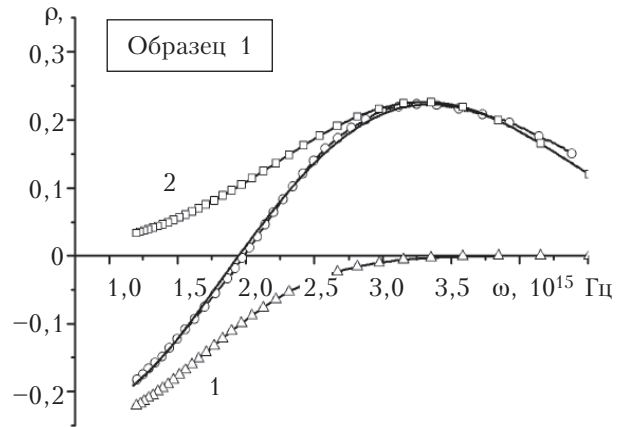


Рис. 5. Экспериментальная и расчетная зависимость  $\rho$  от частоты для образца 1 при  $\theta=50^\circ$ , а также элементарные функции Гаусса (кривые 1 и 2)

пазоне длин волн 0,4 — 1,6 мкм при  $\theta=50^\circ$  и представленная на рис. 4. Как видно, в коротковолновой области в резонансном взаимодействии преобладает  $p$ -поляризованное, а в длинноволновой —  $s$ -поляризованное излучение.

Для определения механизмов резонансного взаимодействия необходимо перестроить спектральную характеристику поляризационной разности  $\rho$  образца 1 в зависимость от частоты (рис. 5). В этом случае два широких экстремума спектральной характеристики могут быть разложены на элементарные компоненты и отображены функциями Гаусса с основными частотами  $\omega_0=0,82 \cdot 10^{15}$  Гц и  $\omega_0=3,3 \cdot 10^{15}$  Гц, сумма которых дает расчетную характеристику, что подтверждается присутствием двух резонансов. Экстремум в высокоэнергетической области характерен для нанокластерных объектов и соответствует резонансному возбуждению так называемых локальных поверхностных плазмонов, возбуждаемых  $s$ -поляризованным излучением. Повидимому, экстремум на частоте  $0,82 \cdot 10^{15}$  Гц связан с плазмон-поляритонным резонансом, который в кластерных объектах обусловлен диполь-дипольным межчастичным взаимодействием.

По полуширине каждой из функций Гаусса были определены коэффициенты затухания для соответствующих резонансов:  $\gamma_{\text{лпр}}=2,5 \cdot 10^{-15}$  с,  $\gamma_{\text{шпр}}=2 \cdot 10^{-15}$  с. Для локального плазмонного резонанса коэффициент затухания  $\gamma_{\text{лпр}}$  зависит от размера и форме наночастичек композита, а для поверхностного плазмон-поляритонного резонанса  $\gamma_{\text{шпр}}$  зависит от распределения расстояния между частицами. Таким образом, из соотношения этих коэффициентов затухания можно сделать вывод, что в исследуемой пленке распределение кластеров по положению в пространстве более однородно, чем по размеру.

Для образцов 2 и 3 спектральные зависимости поляризационной разности, представленные на рис. 6, также могут быть разложены на несколько элементарных функций, хотя они ме-



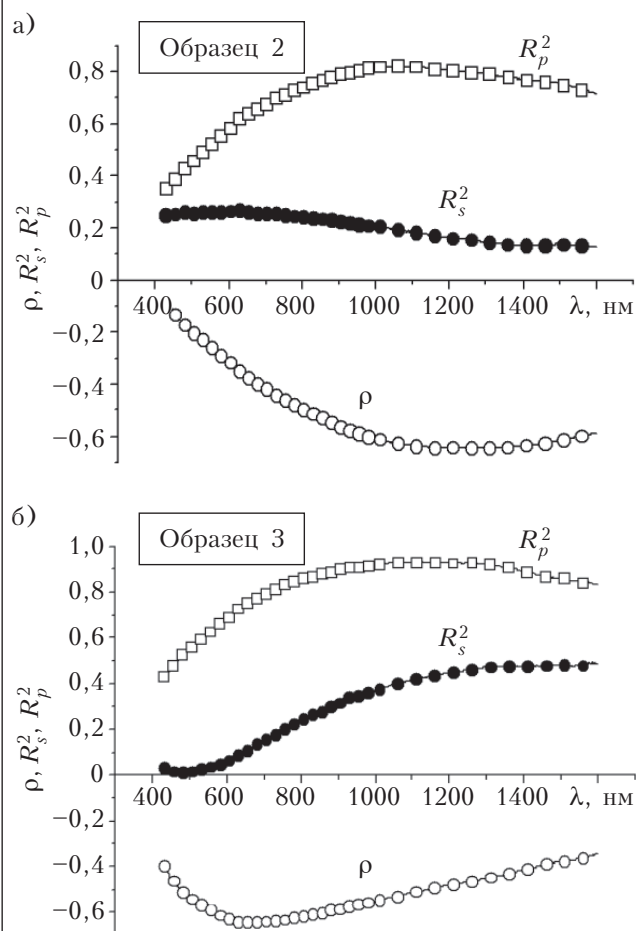


Рис. 6. Спектральная зависимость коэффициентов  $R_s^2$ ,  $R_p^2$  и их разности  $\rho$  для образца 2 при  $\theta=50^\circ$  (а) и для образца 3 при  $\theta=60^\circ$  (б)

нее ярко выражены по сравнению с образцом 1. Это связано с тем, что во всем использованном диапазоне длин волн s-поляризованное излучение поглощается сильнее, функции резонансно-межкластерного дипольного взаимодействия и локального резонанса перекрываются. Также из рис. 6 можно сделать вывод о том, что для образца 2 преобладающим является взаимодействие излучения с поверхностными плазмон-поляритонами, экстремум зависимости находится в длинноволновой области, а в образце 3 преобладает взаимодействие с локальными плазмонами (экстремум в коротковолновой области соответственно).

### Заключение

Кластерные пленки, как металлооксидные [11], так и алмазоподобные, исследованные в настоящей работе, демонстрируют большее разнообразие механизмов взаимодействия с электромагнитным излучением, чем однородные. Об этом убедительно свидетельствуют представленные результаты исследования поверхностного плазмонного резонанса, полученные с помощью

методики поляризационной модуляции. Продуктом этой методики является параметр, называемый поляризационной разностью  $\rho=R_s^2-R_p^2$ . Его многовариантная характеристика в многомерном пространстве координат (угол, длина волны, толщина и т. д.) обеспечивает ему повышенную информационную способность в обнаружении физических свойств объема, относительно которого атомно-силовая микроскопия бессильна.

Из спектральных характеристик параметра  $\rho$  обнаружено, что взаимодействие электромагнитного излучения с электронной системой образцов в используемом спектральном диапазоне волн проявляется в двух поверхностных резонансах — локальном и поляритонном, различающихся частотами и временем релаксации, а соотношение амплитуд резонансов определяется структурными свойствами образцов. Это свидетельствует о перспективности метода модуляционной поляриметрии для диагностики структурной однородности композитных нанокластерных пленок.

Результаты исследований представляют интерес при конструировании и диагностике композиционных нанокластерных материалов.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Елецкий А. В., Искандарова И. М., Книжник А. А., Красиков Д. Н. Графен: методы получения и теплофизические свойства. // Успехи физических наук. — 2011. — Т. 181, В. 12. — С. 233–268. [Elets'kii A. V., Iskandarova I. M., Knizhnik A. A., Krasikov D. N. // Uspekhi fizicheskikh nauk. 2011. Vol. 181, iss. 12. P. 233]
2. Алферов Ж. И., Асеев А. Л., Гапонов С. В. и др. Наноматериалы и нанотехнологии // Нано- и микросистемная техника. — 2003. — № 8. — С. 3–13. [Alferov Zh. I., Aseev A. L., Gaponov S. V. i dr. // Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2003. N 8. P. 3]
3. Богданов А. А., Дайнингер Д., Дюжев Г. А. Перспективы развития промышленных методов производства фуллеренов. // Журнал технической физики. — 2000. — Т. 70, вып. 5. — С. 1–7. [Bogdanov A. A., Daininger D., Dyuzhev G. A. // Zhurnal tekhnicheskoi fiziki. 2000. Vol. 70, iss. 5. P. 1]
4. Цолин П. Л., Петриченко С. В., Демченко О. О. Электроразрядная обработка органических жидкостей — перспективный метод получения новых углеродных наноматериалов. // Матер. 15-й Междунар. конфер. «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах». — Украина, г. Николаев. — 2011. — С. 89–92. [Tsolin P. L., Petrichenko S. V., Demchenko O. O. // Mater. 15-i Mezhdunar. konfer. «Fizika impul'snykh razryadov v kondensirovannykh sredakh». Ukraine, Nikolaev. 2011. P. 89]
5. Костін Є. Г., Полозов Б. П., Федорович О. А. та ін. Плазмохімічний синтез та фізичні дослідження нанорозмірних алмазоподібних плівок // 36. «Українська конференція з фізики плазми та КТС-2011». — Україна, м. Київ. — 2011. — С. 37. [Kostin E. G., Polozov B. P., Fedorovich O. A. ta in. // Zb. «Ukrayins'ka konferentsiya z fiziki plazmi ta KTS-2011». Ukrayina, Kiyiv. 2011. P. 37]
6. Калданов В. А. Исследование источников неравновесной плазмы на основе СВЧ разрядов, предназначенных для осаждения алмазных пленок. / Дис. ... канд. физ.-мат. наук. —

Нижний Новгород. — 2006. [Kaldanov V. A. / Dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. Nizhnii Novgorod. 2006]

7. Опалев О. А., Пашнев В. К., Ковальчук И. К. и др. Синтез алмазных покрытий в тлеющем разряде, стабилизированном магнитным полем. // Вопросы атомной науки и техники, серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения». — 2000. — № 4. — С. 158–164. [Opalev O. A., Pashnev V. K., Koval'chuk I. K. i dr. // Voprosy atomnoi nauki i tekhniki, seriya «Plazmennaya elektronika i novye metody uskoreniya». 2000. N 4. P. 158]

8. Кускова Н. И., Бакларь В. Ю. Процессы получения углеродных наноматериалов электроразрядными методами // Матер. 14-й междунар. конфер. «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах». — Украина, г. Николаев. — 2009. — С. 73–75. [Kuskova N. I., Baklar' V. Yu. // Mater. 14-i mezhdunar. konfer. «Fizika impul'snykh razryadov v kondensirovannykh sredakh». Ukraine, Nikolaev. 2009. P. 73]

9. Иванова В. С., Фолманис Г. Э. От наноматериалов — к интеллектуальным нанотехнологиям // Металлургия машиностроения. — 2007. — № 1. — С. 2–10. [Ivanova V. S., Folmanis G. E. // Metallurgiya mashinostroeniya. 2007. № 1. S. 2]

10. Сердега Б. К. Модуляційна поляриметрия. — Київ: Наукова думка, 2011. [Serdega B. K. Modulyatsiina polyarimetriya. Kiyiv: Naukova dumka, 2011]

11. Sarika Singh, Gupta B. D. Simulation of a surface plasmon resonance-based fiber-optic sensor for gas sensing in visible range using films of nanocomposite // Meas. Sci. Technol. — 2010. — Vol. 21, N 11. — P. 1–8.

12. Бережинский Л. И., Максименко Л. С., Матяш И. Е. и др. Поляризационно-модуляционная спектроскопия поверхностного плазмонного резонанса. // Оптика и спектроскопия. — 2008. — Т. 105, № 2. — С. 281–289. [Berezhinskii L. I., Maksimenko L. S., Matyash I. E. i dr. // Optika i spektroskopiya. 2008. Vol. 105, N 2. P. 281]

13. Харрик Н. Спектроскопия внутреннего отражения. — Москва: Мир, 1970. [Kharrik N. Spektroskopiya vnutrennego otrazheniya. Moscow: Mir, 1970]

14. Jaspersen S. N., Schnatterly S. E. An improved method for high reflectivity ellipsometry based on a new polarization modulation technique // The review of scientific instruments. — 1969. — Vol. 40, N 6. — P. 761–767.

15. Виноградов Е. А., Лескова Т. А., Рябов А. П. Радиационные поверхностные плазмо-пларионы // Оптика и спектроскопия. — 1994. — Т. 76, № 2. — С. 311–322. [Vinogradov E. A., Leskova T. A., Ryabov A. P. // Optika i spektroskopiya. 1994. Vol. 76, N 2. P. 311]

16. Бережинский Л. И., Литвин О. С., Максименко Л. С. и др. Размерные эффекты внутреннего отражения кластерных пленок золота в модуляционно-поляризационном представлении. // Оптика и спектроскопия. — 2009. — Т. 107, № 2. — С. 281–286. [Berezhinskii L. I., Litvin O. S., Maksimenko L. S. i dr. // Optika i spektroskopiya. 2009. Vol. 107, N 2. P. 281]

Дата поступления рукописи  
в редакцию 23.02 2012 г.

Maximenko L. S., Mishchuk O. N., Matyash I. E., Serdega B. K., Kostin E. G., Polozov B. P., Fedorovich O. A., Savinkov G. K. **Modulation polarimetry of full internal reflection, broken by diamond-like films.**

*Key words: spectroscopic measurements, solid state detector spectrometer system, a modular spectrometer.*

This article presents research results on diamond-like films produced under different technological conditions. The parameter  $\rho$  — polarization difference — has been introduced. It has been found from spectral features of the parameter  $\rho$  that the interaction of electromagnetic radiation with the electronic system of specimens, which occurs in the used spectral range, consists of local and polariton surface resonances, differing in frequencies and times of relaxations. The authors concluded that the correlation in resonance intensity is defined by the structural characteristics of the specimens. These results show that modulation polarimetry is a perspective technique for diagnostics of the structural homogeneity of composite nanocluster films.

Ukraine, Kiev, <sup>1</sup>V. Ye. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of NASU, <sup>2</sup>Kiev Institute for Nuclear Research of NASU, <sup>3</sup>«Krypton» STC.

Максименко Л. С., Мищук О. Н., Матяш И. Е., Сердега Б. К., Костін Є. Г., Полозов Б. П., Федорович О. А., Савінков Г. К. **Модуляційна поляриметрія повного внутрішнього відбиття, порушеного алмазоподібними плівками.**

*Ключові слова: алмазоподібні плівки, модуляційна поляриметрия, композитні нанокластерні плівки.*

Досліджено алмазоподібні плівки, спеціально приготовані за різних технологічних умов. Запропоновано параметр  $\rho$ , що названо поляризаційною різницею. Із спектральних характеристик параметру  $\rho$  виявлено, що взаємодія електромагнітного випромінювання з електронною системою зразків, яке відбувається у використуваному спектральному діапазоні, складається з двох поверхневих резонансів — локального та поляритонного, що різняться частотою та часом релаксації. Зроблено висновки, що співвідношення амплітуд резонансу визначається структурними властивостями зразків, що свідчить про перспективність методу модуляційної поляриметрії для діагностики структурної однорідності композитних нанокластерних плівок.

Україна, м. Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАНУ, Інститут ядерних досліджень НАНУ, НТЦ «Криптон».

УДК 621.383.52;535.243

Д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ, к. ф.-м. н. Д. М. ЁДГОРОВА, к. ф.-м. н. Ф. А. ГИЯСОВА,  
к. ф.-м. н. М. А. МИРДЖАЛИЛОВА, Г. О. АСАНОВА, О. А. АБДУЛХАЕВ, Ж. Ф. МУХУТДИНОВ

Узбекистан, г. Ташкент, Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз

E-mail: karimov@uzsci.net

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ТОКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНИЕВОГО ФОТОДИОДА С ВЫПРЯМЛЯЮЩИМИ БАРЬЕРАМИ

*Приведены результаты исследований двухбарьерной фотодиодной кремниевой структуры с встречноключенными выпрямляющими переходами «металл — полупроводник» в фотодиодном и фотовольтаическом режимах включения. Такие структуры представляют интерес для создания устройств приема слабых оптических сигналов.*

**Ключевые слова:** фотодиодные структуры, барьер Шоттки, выпрямляющий переход, двухсторонняя чувствительность.

В настоящее время для передачи и приема информации все чаще применяют оптические системы. Их важными элементами являются приемные оптические модули, преобразующие оптические сигналы, принимаемые фотоприемником, в электрические, которые обрабатываются далее электронными устройствами. При этом от фотоприемника требуется высокая чувствительность даже к очень слабому оптическому сигналу, малая инерционность и низкий уровень шума [1, 2]. Этим требованиям в определенной степени отвечают фототранзисторы и фотодиоды без накопления зарядов. Однако постоянная времени фототранзистора больше, чем у фотодиода, что ограничивает его применение в системах связи [2]. Эту проблему можно решить путем создания структур с двумя барьерами Шоттки на основе кремния. Такой выбор материала обусловлен тем, что кремний является наиболее освоенным, технологически отработанным материалом. Однако остаются малоизученными фотодиодные структуры с двумя барьерами на его основе. Создание второго-третьего барьера в фотодиодной структуре способствует уменьшению ее емкости [3], усилению первичного фототока [4], увеличению частотного диапазона и быстродействия [5]. Настоящая работа посвящена исследованию процесса формирования токовых характеристик двухбарьерной фотодиодной кремниевой  $\text{Au} - n\text{Si} - \text{Au}$ -структуры с встречноключенными выпрямляющими переходами «металл — полупроводник» в фотодиодном и фотовольтаическом режимах включения.

### Образцы и методика исследований

Исследуемые фотодиоды получены на основе монокристаллического кремния  $n$ -типа проводимости с концентрацией носителей  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и удельным сопротивлением 2 Ом·см. Предварительная

обработка пластин включала шлифовку и последующую полировку обеих поверхностей алмазной пастой АСМ-1.5. Перед нанесением металлических слоев кремниевые пластины обрабатывали в полирующем травителе  $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{CH}_3\text{COOH}$  (1:8:1), затем промывали в деионизованной воде и просушивали. Толщина базовой области составляла 300 мкм, а площадь —  $0,54 \text{ см}^2$ .

Для получения выпрямляющих  $p - n$ -контактов к полированным поверхностям пластин кремния сначала в вакууме на одну поверхность напыляли Au, нагревали до  $350^\circ\text{C}$ , выдерживали в течение 30 с и затем в камеру запускали воздух. В результате получали  $\text{Au} - n\text{Si}$ -переход. Далее пластину кремния с нанесенным слоем переворачивали, напыляли Au на вторую поверхность для получения  $n\text{Si} - \text{Au}$ -перехода и проводили повторный отжиг при  $350^\circ\text{C}$  в течение 30 с, после чего медленно охлаждали.

Таким образом, первый слой Au отжигали дважды, и если между ним и  $n\text{Si}$  при повторном отжиге имела место диффузия и формировался инверсионный слой за счет образованных акцепторных центров [6], то со стороны свободной поверхности происходило закрепление (закалка) естественного оксидного нанослоя толщиной  $40 \text{ \AA}$  [7], на который затем напыляли второй слой Au. Готовая  $\text{Au} - n\text{Si} \cdot \text{SiO}_2 - \text{Au}$ -структура с тонким промежуточным слоем  $\text{SiO}_2$  имела большой темновой ток в режиме запираания  $\text{Au} - n\text{Si}$ -перехода и, следовательно, несимметричную вольт-амперную характеристику (ВАХ). При этом она обладала двухсторонней чувствительностью, в частности при подсветке со стороны  $n\text{Si} \cdot \text{SiO}_2 - \text{Au}$ -перехода наблюдался фотовольтаический эффект. Как показано на **рис. 1**, спектральный диапазон фотоотклика двухба-



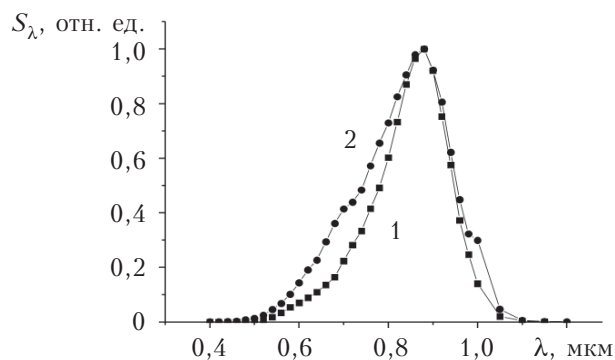


Рис. 1. Спектральная характеристика фотоотклика фотодиода с  $p-nSi$ -переходом (1) и  $Au-SiO_2 \cdot nSi-Au$ -структуры (2)

рьерной структуры (кривая 2) охватывает от 0,5 до 1,1 мкм и, в отличие от фотодиода с  $p-nSi$ -переходом (кривая 1), в видимой области спектра наблюдается увеличение полуширины ее спектральной чувствительности в направлении коротковолнового края спектра.

### Экспериментальные результаты

Полученную двухстороннюю структуру освещали вольфрамовой лампой накаливания с максимумом излучения при  $\lambda = 860$  мкм. Как видно на рис. 2, а, фототок короткого замыкания  $I_{кз}$  с ростом интенсивности интегрального освещения вплоть до 300 лк резко возрастает и далее выходит на насыщение. Такое поведение тока короткого замыкания можно объяснить влиянием неосвещаемого барьера, выступающего в качестве последовательного сопротивления, ко-

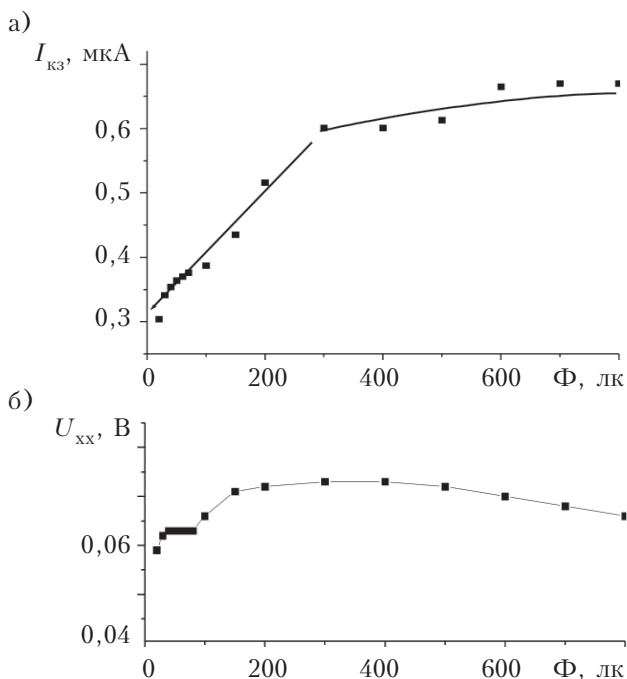


Рис. 2. Зависимость тока короткого замыкания (а) и напряжения холостого хода (б) от интенсивности интегрального освещения  $Au-SiO_2 \cdot nSi-Au$ -структуры

торое уменьшается с повышением интенсивности освещения [8].

Напряжение холостого хода  $U_{хх}$  структуры с ростом интенсивности освещения до 300 лк также увеличивается и далее плавно снижается, как показано на рис. 2, б.

При освещении структуры с любой стороны появляется фото-эдс положительной полярности на одном и том же выводе ( $nSi-SiO_2-Au$ ). При смене освещаемой поверхности меняются значения фототока. При подаче положительного напряжения на электрод, создающий ЭДС положительной полярности, т. е.  $(+)Au-SiO_2 \cdot nSi-Au(-)$ , как темновой, так и световой токи имеют большие значения, чем при обратной полярности напряжения (рис. 3, а). Здесь ветвь с большим током можно считать прямой. Так как переход  $Au-SiO_2 \cdot nSi$  включен в прямом направлении, напряжение, приложенное к структуре в направлении  $(+)Au-SiO_2 \cdot nSi-Au(-)$ , вызывает темновой ток запираемого перехода  $nSi-Au$  (кривая 1).

При смене полярности приложенного напряжения, т. е.  $(-)Au-SiO_2 \cdot nSi-Au(+)$ , переход  $Au-SiO_2 \cdot nSi$  становится запираемым. Следовательно, через оба перехода будут протекать обратные токи. При этом обратный ток  $nSi-Au$ -перехода больше тока  $Au-SiO_2 \cdot nSi$ -перехода, а токи насыщения отличаются на один порядок (см. рис. 3, б).

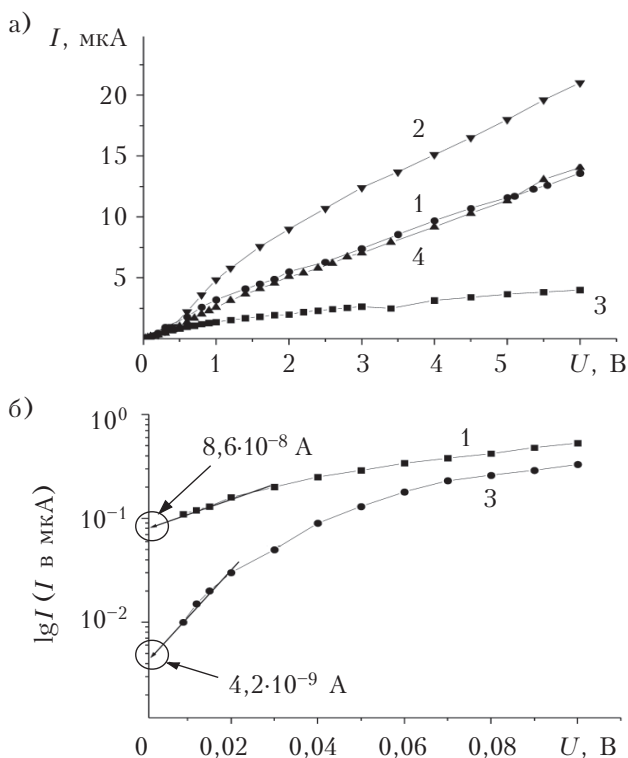


Рис. 3. Зависимость от рабочего напряжения темнового (1, 3) и светового тока при  $\Phi = 10$  лк (2, 4) (а) при прямом (1, 2) и обратном (3, 4) включении и начальные участки темновых ВАХ (б)

Наблюдаемое поведение токовых характеристик можно объяснить следующей моделью. От подсветки в  $\text{Au} - \text{SiO}_2 \cdot n\text{Si} - \text{Au}$ -структуре создается фото-эдс, которая компенсируется прямо смещающим напряжением, и после полной компенсации световой ток начинает возрастать (кривая 2), как и темновой ток другого перехода (кривая 1). В другом направлении, в режиме запирающего, световой ток (кривая 4) ограничивается запираемым фотогенерирующим переходом с меньшим темновым током (кривая 3).

Таким образом, в  $\text{Au} - \text{SiO}_2 \cdot n\text{Si} - \text{Au}$ -структуре при освещении со стороны перехода с низким током насыщения создается фотовольтаическая эдс, которая больше, чем на переходе с большим током насыщения. При этом знак фото-эдс не меняется при смене освещаемой поверхности.

Обнаруженную независимость полярности фотовольтаического эффекта от того, какая поверхность освещается, можно объяснить тем, что большая фото-эдс создается со стороны поверхности с положительной полярностью, а малая с противоположной полярностью — на другом переходе. То есть, при освещении с другой стороны излучение достигает области перехода, где генерация фототока происходит с высокой эффективностью, а возникшая эдс компенсирует генерируемую в освещаемом переходе фото-эдс, значение которой невелико. По мере увеличения интенсивности освещения значения эдс, генерируемых на каждом переходе, сближаются, компенсируя друг друга.

Эквивалентная схема двухбарьерной структуры представляет собой два диода, один из которых создает фото-эдс, и при замыкании его выводов получается фототок короткого замыкания. В этом случае второй диод служит нагрузкой, и ток через него проходит беспрепятственно. При подаче от внешнего блока питания нарастающего напряжения, появляющаяся с начала фото-эдс компенсируется напряжением противоположной полярности, и ток в цепи будет увеличиваться с ростом напряжения за счет инжекции носителей через прямосмещаемый освещаемый переход. При смене полярности источника питания освещаемый переход запирается и входит в режим фотодиода, в результате появляется фотогенерационный ток, который суммируется с темновым током.

\*\*\*

Таким образом, установлено, что фотогенерация носителей осуществляется более интенсивно в переходе «металл — полупроводник» с меньшим током насыщения. В режиме прямого смещения фотогальванического перехода зависимость тока от напряжения в запираемом переходе имеет возрастающий характер, т. е. этот переход не ограничивает ток резко. В результате при освещении осуществляется инжекция но-

сителей через прямосмещаемый переход и перераспределение напряжения на запираемый переход. Однако при смене полярности ток через диод ограничивается, что снижает значения фототока. Изученные двухбарьерные структуры представляют интерес для создания устройств приема слабых оптических сигналов.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Андреев В. А., Бурдин В. А., Попов Б. В., Польников А.И. Строительство и техническая эксплуатация волоконно-оптических линий связи. — Москва: Радио и связь, 1996. [Andreev V. A., Burdin V. A., Popov B. V., Pol'nikov A.I. Stroitel'stvo i tekhnicheskaya ekspluatatsiya volokonno-opticheskikh linii svyazi. Moscow: Radio i svyaz', 1996]
2. Варава Н., Никоноров М., Пронин С. Оптические усилители edfa: практическое применение // Первая миля. — 2011. — № 3. — С. 48—52. [Varava N., Nikonorov M., Pronin S. // Pervaya milya. — 2011. № 3. S. 48]
3. Абдулхаев О. А., Асанова Г. О., Ёдгорова Д. М. и др. Исследование влияния потенциальных барьеров на механизмы токопереноса во встречновключенных двухбарьерных кремниевых структурах // Физическая инженерия поверхности. — 2011. — Т. 9, № 3. — С. 262—268. [Abdulkhaev O. A., Asanova G. O., Yodgorova D. M. i dr. // Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti. 2011. Vol. 9, N 3. P. 262]
4. Ёдгорова Д. М. Эффект усиления фототока в фотодиодной структуре с прямо- и обратновключенными переходами // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2010. — № 1. — С. 3—5. [Yodgorova D. M. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparatyre. 2010. N 1. P. 3]
5. Аверин С. В., Сашо Р. Быстродействующие МПМ-фотодиоды // Матер. 13-й Междунар. конф. «КрыМиКо-2003». — Украина, Крым, г. Севастополь. — 2003. — С. 189—190. [Averin S. V., Sasho R. // Mater. 13-i Mezhdunar. konf. «KryMiKo-2003». Ukraine, Crimea, Sevastopol. 2003. P. 189]
6. Беляев А. Е., Болтовец Н. С., Капитанчук Л. М. и др. Омические контакты  $\text{Au} - \text{Ti} - n^+\text{Si}$ ,  $\text{Au} - \text{Ti} - \text{Pd}_2\text{Si} - n^+\text{Si}$  к кремниевым СВЧ диодам // Техника и приборы СВЧ. — 2009. — № 2. — С. 31—34. [Belyaev A. E., Boltovets N. S., Kapitanchuk L. M. i dr. // Tekhnika i Pribory SVCh. Odessa, N 2. P. 31]
7. Филатова Е.О., Соколов А.А., Тарачева Е.Ю., Багров И.В. Исследование естественного окисла на поверхности монокристаллического кремния (111) и (100) марки КЭФ (111) и марки КДБ методом спектроскопии отражения // Письма в ЖТФ. — 2009. — Т. 35, вып 2. — С. 36—41. [Filatova E.O., Sokolov A.A., Taracheva E.Yu., Bagrov I.V. // Pis'ma v ZhTF. 2009. Vol. 35, iss 2. P. 36]
8. Светличный А. М., Агеев О. А., Шляховой Д. А. Особенности получения тонких пленок  $\text{SiO}_2$  методом быстрой термической обработки // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2001. — № 4—5. — С. 38—43. [Svetlichnyi A. M., Ageev O. A., Shlyakhovoi D. A. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparatyre. 2001. N 4—5. P. 38]

Дата поступления рукописи  
в редакцию 28.08 2012 г.

Karimov A. V., Yodgorova D. M., Giyasova F. A., Mirdzhalilova M. A., Asanova G. O., Abdulkhaev O. A., Mukhutdinov Zh. F. **Study on the formation of current characteristics of a silicon photodiode with rectifying barriers.**

*Keywords: photodiode structures, Schottky barriers, rectifying junction, two-way sensitivity.*

The article presents the results of studies on silicon photodiode double-barrier structure with back-to-back rectifying junctions «metal — semiconductor» in the photodiode and photovoltaic modes. Such structures are of interest for the development of input devices for weak optical signals.

Uzbekistan, Tashkent, Physical-Technical Institute of SPA «Physics-Sun» of NAS of Uzbekistan.

Карімов А. В., Йодгорова Д. М., Гіасова Ф. А., Мірджалілова М. А., Асанова Г. О., Абдулхаєв О. А., Мухутдінов Ж. Ф. **Дослідження процесу формування струмових характеристик кремнієвого фотодіода з випрямляючими бар'єрами.**

*Ключові слова: фотодіодні структури, бар'єр Шоткі, випрямляючий перехід, двостороння чутливість.*

Наведено результати досліджень двобар'єрної фотодіодної кремнієвої структури з зустрічновіткеними випрямляючими переходами «метал — напівпровідник» у фотодіодному та фотовольтаїчному режимах включення. Такі структури становлять інтерес для створення пристроїв прийому слабких оптичних сигналів.

Узбекистан, Ташкент, Фізико-технічний інститут НВО «Фізика-Сонце» АН РУз.

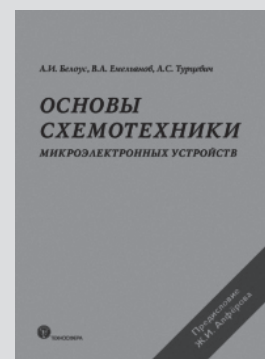
НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



**Белоус А. И., Емельянов В. А., Турцевич А. С. Основы схемотехники микроэлектронных устройств.**— Москва: Техносфера, 2012.— 472 с.

В книге представлен анализ особенностей работы, методы проектирования и основы практического применения цифровых микросхем в составе современных микроэлектронных устройств, предложен большой набор эффективных схемотехнических решений базовых элементов для реализации требований, предъявляемых к микроэлектронным устройствам, приведено детальное описание принципов работы и правил применения современных базовых элементов в составе микроэлектронных устройств. Издание ориентировано на широкий круг инженерно-технических работников, ученых, студентов и аспирантов, специализирующихся в области разработки, организации производства и эксплуатации радиоэлектронной бытовой, промышленной и специальной техники, в информационно-коммуникационных, телекоммуникационных и навигационных сферах, где используются современные микроэлектронные устройства.



НОВЫЕ КНИГИ



**Куэй Р. Электроника на основе нитрида галлия / Под ред. А. Г. Васильева.**— Москва: Техносфера, 2011.— 592 с.

Представленный в книге аналитический обзор охватывает свыше 1750 работ, посвященных III-N полупроводникам, которые применяются для создания транзисторов и радиоэлектронных устройств большой мощности, работающих в СВЧ-диапазоне частот. Рассмотрены материалы, приборы, их технология, моделирование, проблемы надежности и применения. Книга предназначена для студентов, аспирантов, инженеров, разработчиков приборов и соответствующей аппаратуры.





УДК 621.382:029/64

К. т. н. В. П. ПОПОВ, к. т. н. В. П. СИДОРЕНКО

Украина, г. Киев, НИИ микроприборов НТК «ИМК» НАНУ

E-mail: popov\_v@imd.org.ua

## МАЛОШУМЯЩИЕ УСИЛИТЕЛИ НА ОСНОВЕ SiGe-HBT ДЛЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИСТЕМ

Рассмотрены принципы построения интегральных схем малошумящих усилителей (МШУ) на основе кремний-германиевых гетеропереходных биполярных транзисторов (SiGe HBT) для сверхширокополосных (СШП) систем. СШП-системы диапазона 0,5–10,6 ГГц применяются в области связи, радаров медицинского назначения и системах обеспечения безопасности. Предложенные СШП МШУ выполнены по безындуктивным электрическим схемам или схемам с минимальным числом индуктивностей. Проведено исследование и расчеты двух вариантов СШП МШУ. Диапазон рабочих частот — от 0,5 до 11 ГГц.

**Ключевые слова:** сверхширокополосные (СШП) системы, СШП-радары медицинского назначения, малошумящие усилители, кремний-германиевый гетеропереходный биполярный транзистор (SiGe-HBT), резистивные обратные связи.

Сверхширокополосные (СШП) системы активно развиваются в течение последних 10–15 лет из-за их уникальных возможностей по увеличению объема передаваемой и принимаемой информации. В соответствии с определением Федеральной комиссии связи США (FCC) [1–4] к СШП отнесены системы (сигналы), обладающие одним из следующих свойств:

1) ширина спектра излучаемых сигналов  $f_b - f_n$  не менее 500 МГц ( $f_b$  и  $f_n$  — верхняя и нижняя граничные частоты спектра сигнала на уровне –10 дБ от максимального значения);

2) отношение ширины спектра  $f_b - f_n$  (по уровню –10 дБ) к средней частоте спектра  $(f_b + f_n)/2$  не менее 0,2.

Относительная ширина спектра  $B_f = 2(f_b - f_n)/(f_b + f_n)$  для различных сигналов (рис. 1) имеет следующие значения:

узкополосные (УП)	$B_f < 0,01$ ;
широкополосные (ШП)	$0,01 < B_f < 0,2$ ;
СШП	$B_f > 0,2$ .

Большинство радиотехнических систем в настоящее время используют УП- и ШП-сигналы, однако область применения СШП-сигналов и систем расширяется. Основное применение СШП-сигналов находят в системах высокоскоростной и низкоскоростной связи (стандарты IEEE-Std 802.15.3a, 802.15.4a) [4] и в радиолокационной технике (радары) медицинского применения [5–7] и обеспечения безопасности — сканирование багажа, обнаружение людей под завалами и препятствиями и др. [3, 8]. В соответствии со стандартами FCC уровни излучения СШП-сигналов должны быть ограничены ниже порога шумов УП- и ШП-сигналов (–41,3 дБм/МГц или

75 нВт/МГц), как показано на рис. 1. Это позволяет избежать или уменьшить нежелательную интерференцию с сигналами обычных УП- и ШП-систем, а также делает возможным безлицензионное применение СШП-систем наряду с обычными системами в диапазоне частот 3,1–10,6 ГГц.

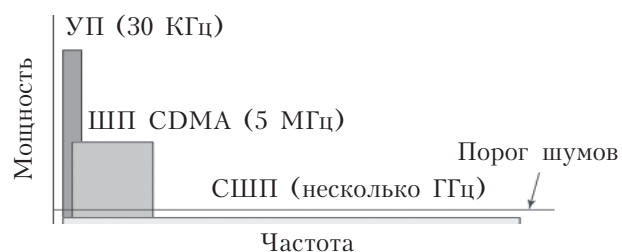


Рис. 1. Спектры узкополосного (УП), широкополосного, сверхширокополосного сигналов

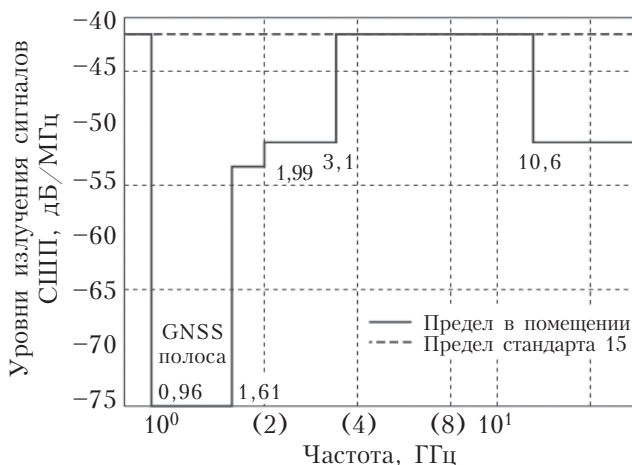


Рис. 2. Допустимые уровни излучения сигналов СШП-систем для помещений

Стандарты FCC регламентируют уровни излучения СШП-сигналов для разных применений. Например, на **рис. 2** показана маска предельных уровней излучения СШП-систем связи для помещений (indoor). Минимальные уровни излучения СШП-сигналов допускаются в диапазоне частот 0,96–1,61 ГГц, где действуют глобальные навигационные спутниковые системы GNSS (GLONASS/GPS/GALILEO/COMPASS).

Маски предельных уровней излучения СШП-сигналов имеются и для других систем — для работы вне помещений (outdoor), для радаров различного применения (медицина, наблюдение за объектами за стенами, завалами), для автомобильных радаров диапазона 22–29 ГГц.

Диапазон применения СШП-систем в коммерческих и военных целях чрезвычайно многообразен. Большие их преимущества во многих применениях по сравнению с обычными УП- и ШП-системами дают основания предположить, что они имеют большую перспективу развития.

Структурные схемы аналоговой части СШП-приемопередатчиков значительно более просты, чем обычные УП- и ШП-системы (**рис. 3**).

Длительность и форма СШП-импульсов, формируемых передатчиком, определяют форму и ширину спектра сигнала. Длительность импульсов порядка 1–2 нс с огибающей, близкой к гауссовой кривой, заполнение импульса синусоидальными колебаниями или разнополярными видеоимпульсами, а также вид модуляции зависят от типа СШП-системы. В приемнике после фильтрации, усиления малошумящим усилителем (**МШУ**) и корреляционной обработки выходные данные поступают на цифровой процессор. Реализация СШП-приемопередатчика (трансивера) или отдельных его элементов в виде интегральной микросхемы может быть осуществлена на основе радиочастотной (**РЧ**) КМОП-или БиКМОП-технологии [9]. Пример реализации СШП МШУ на основе 0,18 мкм РЧ КМОП-технологии приведен в [10]. Диапазон рабочих частот данного МШУ равен 1,0–11,6 ГГц, максимальный коэффициент усиления 13 дБ, коэффициент шума 3,6–4,8 дБ. МШУ содержит две индуктивности 3,6 и 1,84 нГн.

Многие работы посвящены решению задачи разработки СШП МШУ на основе SiGe-HBT

[11–15], т. к. они имеют более низкий коэффициент шума и минимальную площадь кристалла МШУ. В настоящей статье представлены результаты разработки двух вариантов СШП МШУ с резистивными обратными связями диапазона 0,5–11 ГГц на основе технологии кремний-германиевых гетеропереходных биполярных транзисторов (SiGe-HBT), которая является составной частью современных БиКМОП-технологий.

### СШП МШУ с резистивными обратными связями

При разработке СШП МШУ ставятся задачи получения:

- 1) полосы пропускания 5–10 ГГц в диапазоне 0,5–11 ГГц в зависимости от основного применения МШУ;
- 2) коэффициента усиления 12–20 дБ;
- 3) минимального коэффициента шума;
- 4) согласования входного и выходного импедансов в рабочей полосе частот, максимально близкого к 50 Ом (минимальные значения параметров  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  матрицы рассеяния);
- 5) минимальной потребляемой мощности;
- 6) минимальной площади кристалла микросхемы.

Используются также другие критерии качества МШУ, например параметры  $IP_3$  и  $P_{-1dB}$ , характеризующие нелинейные искажения.

Минимальная площадь кристалла при использовании современных технологий обеспечивается выбором безындуктивных электрических схем или схем с минимальным количеством индуктивностей, поскольку спиральные индуктивности занимают основную площадь на кристалле и требуют экранировки от подложки. Это относится как к SiGe-HBT, так и к РЧ КМОП [10] МШУ.

В СШП МШУ1, МШУ2 на основе SiGe-HBT, рассмотренных в данной работе, необходимая полоса пропускания достигается применением резистивных отрицательных обратных связей (**ООС**) с частотно-корректирующими емкостными или индуктивными элементами.

При проектировании МШУ использовалась технология SiGe-HBT уровня 0,5 мкм (ширина эмиттера) с граничной частотой транзисторов  $f_T=47$  ГГц.

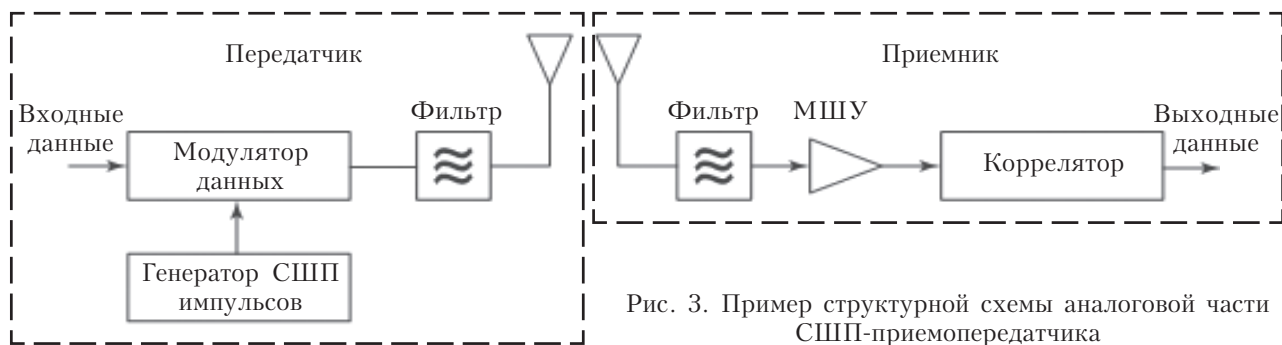


Рис. 3. Пример структурной схемы аналоговой части СШП-приемопередатчика

Расчет параметров проводился с использованием SPICE-модели Гуммеля—Пуна (SPICE Gummel—Poon, SPG) для SiGe-HBT. Данная модель характеризуется системой из 60 параметров, но нами использовались 27, и это позволяло достаточно точно моделировать характеристики постоянного тока и частотные характеристики МШУ.

#### МШУ1 диапазона частот 0,5—5 ГГц

Схема СШП МШУ диапазона частот 0,5—5 ГГц, обозначенного МШУ1, приведена на **рис. 4**. Транзисторы Q1, Q2 образуют каскодный усилитель с резистивно-индуктивной нагрузкой (R3, L1) и цепями последовательной (R4, C3) и параллельной (R5, R6, Q3) обратной связи. Индуктивность L1 и конденсатор C3 выполняют функции частотной коррекции, расширяя полосу пропускания в области высоких частот. Транзистор Q3 в диодном режиме и резистор R6 позволяют выбрать оптимальные параметры резистора R5.

Режим работы каскодного усилителя задается цепями ООС (Q2) и делителя напряжения R1, R2 (Q1). При напряжении питания  $V_{cc}=3,3$  В ток транзистора Q3 и резистора R5 делится на базовый ток Q2 (57,8 мкА) и ток резистора R6 (188 мкА), который уменьшает сопротивление диода Q3 по переменному току и стабилизирует режим каскодного усилителя и параметры МШУ1 при изменении напряжения питания  $V_{cc}$ . Диод Q3 выполняет также сдвиг уровня постоянного напряжения на 0,843 В между стоком транзистора Q1 и резистором R5.

Транзистор Q4 и резистор R7 образуют эмиттерный повторитель, режим работы которого выбран таким образом, чтобы обеспечить широкополосное согласование с нагрузкой 50 Ом.

Для уменьшения базового сопротивления транзисторов и оптимизации топологии в СШП МШУ1 (и в МШУ2 тоже) принята секционная кон-

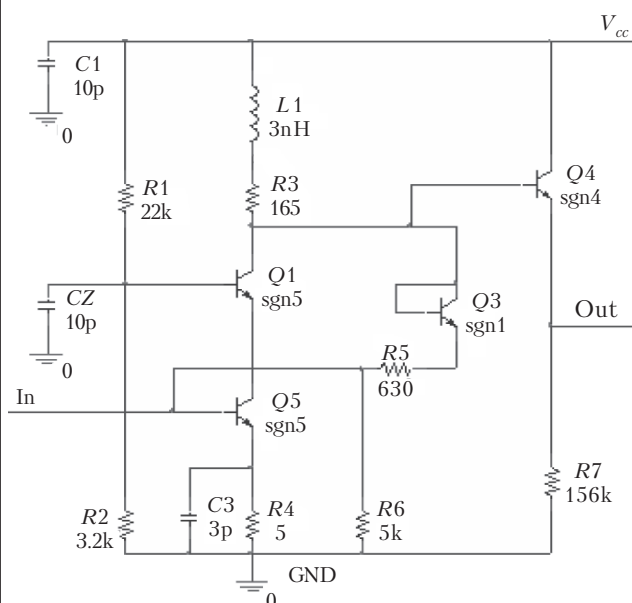


Рис. 4. Схема МШУ1 с резистивными ООС

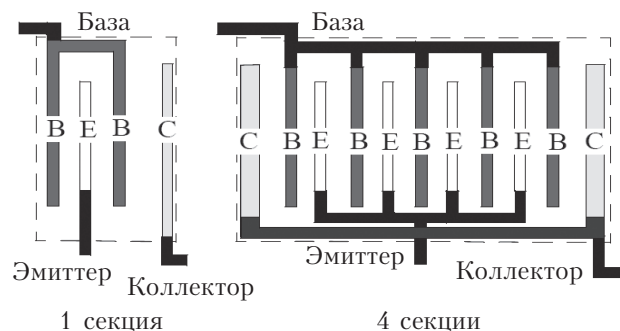


Рис. 5. Структура одно- и четырехсекционного SiGe-HBT

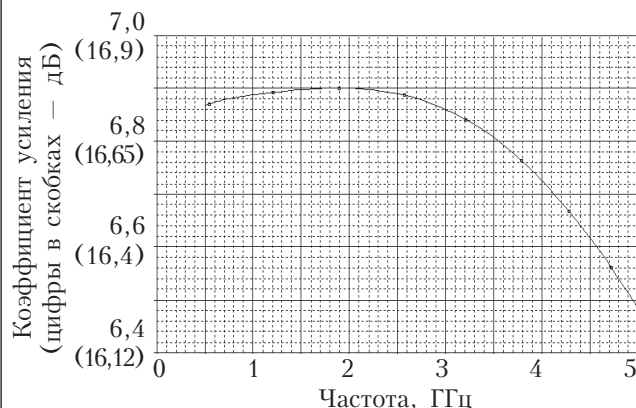


Рис. 6. АЧХ коэффициента усиления МШУ1 с неравномерностью 0,54 дБ

рукция с симметричным расположением областей базы относительно областей эмиттеров. На **рис. 5** приведено изображение структуры односекционного и четырехсекционного транзисторов. Размер эмиттера одной секции равен  $0,5 \times 10$  мкм<sup>2</sup>. На схеме **рис. 4** указано количество секций каждого из транзисторов (sgn – SiGe, n-эмиттер).

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) коэффициента усиления (КУ) МШУ1 приведена на **рис. 6**. Неравномерность АЧХ в указанном диапазоне составляет 0,54 дБ с максимальным КУ 16,78 дБ на частоте 2 ГГц.

Входной импеданс (входное сопротивление) МШУ1 зависит от КУ, входного тока транзистора Q2 и сопротивления R5 в цепи обратной связи. АЧХ входного тока при входном напряжении 10 мВ и входного сопротивления МШУ1 показаны на **рис. 7**. Оптимальное согласование с сопротивлением источника сигнала 50 Ом получается на частоте 1,8 ГГц. Согласование по величинам параметров  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  матрицы рассеяния, которые через параметры сопротивлений источника сигнала и нагрузки  $R_S$ ,  $R_L$  и входного, выходного сопротивлений  $Z_{IN}$ ,  $Z_{OUT}$  выражаются как

$$S_{11} = \frac{Z_{IN} - R_S}{Z_{IN} + R_S}, \quad (1)$$

$$S_{22} = \frac{Z_{OUT} - R_L}{Z_{OUT} + R_L}. \quad (2)$$



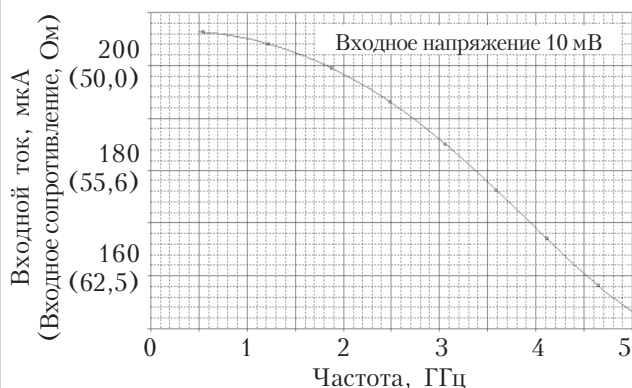


Рис. 7. АЧХ входного тока (входного сопротивления) МШУ1

Максимальные значения  $S_{11}(\text{дБ}) = 20 \lg S_{11}$  МШУ1 на частотах 0,5 и 5 ГГц составляют  $-36,7$  и  $-17,56$  дБ, что вполне приемлемо.

Выходное сопротивление  $R_{OUT}$  МШУ1 определяется режимом работы транзистора  $Q4$  — током эмиттера и проводимостью  $g_m = \Phi_T / I_E$  ( $\Phi_T$  — температурный потенциал,  $I_E$  — ток эмиттера), которые прямо зависят от сопротивления нагрузки эмиттера  $R7$ . Расчет частотной характеристики  $R_{OUT}$  проводился по формуле

$$R_{OUT} = \frac{V_{OUT}(R_{L2}) - V_{OUT}(R_{L1})}{I_{OUT}(R_{L1}) - I_{OUT}(R_{L2})} = \frac{\Delta V_{OUT}}{\Delta I_{OUT}} \quad (3)$$

с предварительным расчетом АЧХ выходных напряжений и токов  $V_{OUT}$ ,  $I_{OUT}$  при двух значениях сопротивления нагрузки  $R_L$ , например 50 и 100 Ом.

Результаты расчетов  $R_{OUT}$  и  $S_{22}(\text{дБ}) = 20 \lg S_{22}$  приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры МШУ1

Частота, $f$ , ГГц	$R_{OUT}$ , Ом	$S_{22}$ , дБ
1,0	48,7	-37,6
1,5	50,4	-48,2
2,0	52,81	-31,3
3,0	60,07	-20,3
4,0	76,64	-13,5
5,0	83	-12,1

Основные компоненты, влияющие на коэффициент шума МШУ1 входят в формулу

$$NF = 1 + \frac{(r_{b2} + 1/g_{m2} + R_4)}{R_s} + 2g_{m2}R_s \left( \frac{f}{f_T} \right)^2 + \frac{g_{m2}}{2\beta_0 R_s} (R_s + r_{b2})^2, \quad (4)$$

где  $r_{b2}$ ,  $g_{m2}$ ,  $\beta_0$  — базовое сопротивление, проводимость и коэффициент усиления тока транзистора  $Q2$  соответственно.

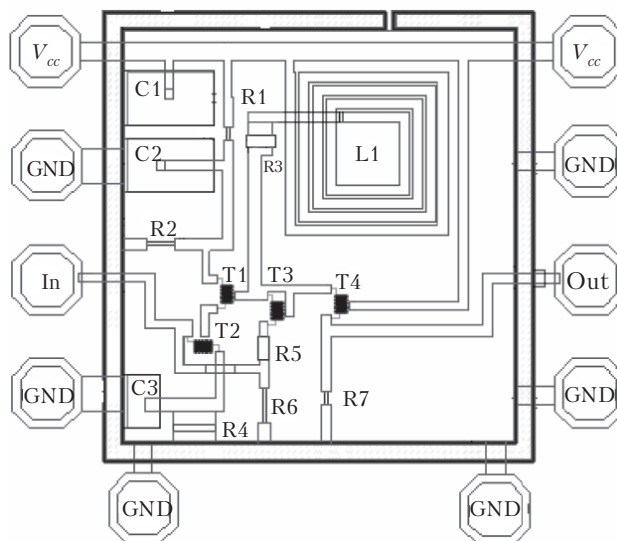


Рис. 8. Топологическая схема кристалла МШУ1

Коэффициент шума МШУ1 в частотном диапазоне 0,5–5 ГГц не превышает 2 дБ.

Во многих странах, в том числе и в Европе, СШП-диапазон разбит на два поддиапазона: 3,1–4,8 и 6–10,6 ГГц, т. к. полоса 5,2–5,8 ГГц предназначена для работы систем связи стандартов IEEE 802.11a/п и других. МШУ1 может быть использован в СШП-системах диапазона 0,5–5 ГГц, а также в GNSS диапазона 1,1–1,6 ГГц и системах связи диапазона 2–3 ГГц.

На рис. 8 показана топологическая схема размещения элементов МШУ1 на кристалле на основе технологии SiGe2-RF (Atmel, Германия), с минимальной шириной эмиттера 0,5 мкм [16]. Максимальную площадь занимает корректирующая индуктивность  $L1$  (третий слой металла) с внешними размерами  $196 \times 196$  мкм<sup>2</sup>. В конденсаторах с удельной емкостью 1,1 фФ/мкм<sup>2</sup> используется структура «металл — диэлектрик — металл» (МДМ) на основе слоев металла 2 и 2а. В качестве резисторов использован  $p^+$ -легированный поликремний с поверхностным сопротивлением 150 Ом/□. Площадь активной части кристалла без контактных площадок равна  $0,518 \times 0,536$  мм<sup>2</sup>.

#### МШУ диапазона частот 0,5–11 ГГц

Схема СШП МШУ диапазона 0,5–11 ГГц, обозначенного МШУ2, выполнена на двух каскадах усиления и приведена на рис. 9. Данная схема подобна варианту 2 в [14] за исключением того, что в ней отсутствует индуктивность между каскадами. Первый каскад на транзисторах  $Q1$  с общим эмиттером и  $Q2$  с общим коллектором содержит резистивные цепи ООС — параллельную на резисторе  $R3$  и последовательную с резистором  $R2$ . Второй каскад на транзисторе  $Q4$  с общим эмиттером также содержит две цепи ООС — параллельную с элементами  $Q3$ ,  $R5$  и последовательную ( $R6$ ). Конденсаторы  $C2$ ,  $C3$  выполняют функцию частотной кор-

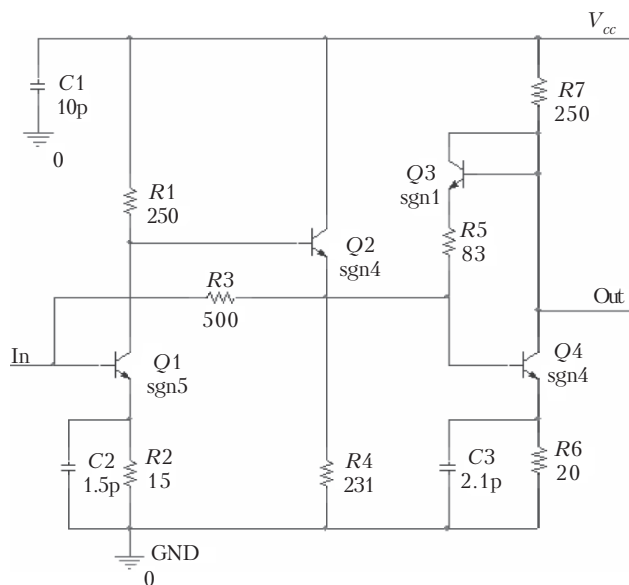


Рис. 9. Схема МШУ2 с резистивными ООС диапазона 0,5–11 ГГц

рекции. Схема МШУ2 не содержит переходных конденсаторов и может быть использована от самых низких частот. Транзистор Q3 в диодном включении смещает уровень постоянного напряжения в цепи ООС на 0,866 В. При токе диода Q3 0,54 мА его сопротивление на переменном токе  $R_e = 1/g_m$  равно 48,5 Ом и оказывает влияние на параметры цепи ООС, коэффициент усиления и выходное сопротивление МШУ2.

Отсутствие индуктивностей и минимальное количество конденсаторов позволяет получить минимальную площадь кристалла.

АЧХ коэффициента усиления МШУ2 приведена на рис. 10. Неравномерность АЧХ в этом диапазоне не превышает 2,5 дБ с максимальным КУ 19,86 дБ на частоте 5 ГГц.

Согласование входного импеданса с сопротивлением источника сигнала  $R_s = 50$  Ом зависит от КУ первого каскада, входного тока транзистора Q1 и сопротивления R3 в цепи ООС. АЧХ входного тока при входном напряжении 10 мВ и входного сопротивления МШУ2 показаны на

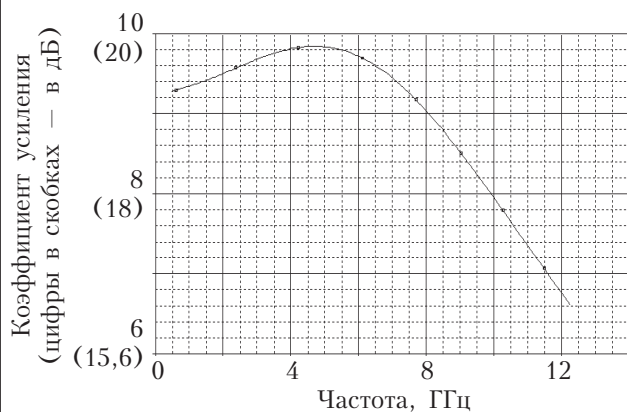


Рис. 10. АЧХ МШУ2 с неравномерностью 2,5 дБ

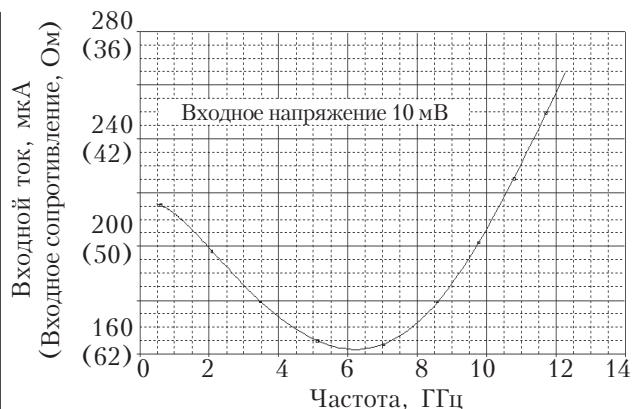


Рис. 11. АЧХ входного тока (входного сопротивления) МШУ2

рис. 11. Оптимальное согласование с сопротивлением источника сигнала 50 Ом получается на частотах 2 и 9,7 ГГц. Максимальная величина  $S_{11}$  (дБ)  $= 20 \lg S_{11}$  МШУ2 на частоте 6,3 ГГц составляет  $-19,5$  дБ, т. е. согласование по входу обеспечивается во всем диапазоне частот.

В отличие от предыдущей схемы выходное сопротивление  $R_{OUT}$  МШУ2 определяется параметрами цепи ООС (Q3, R5) и сопротивлением нагрузки R7 выходного каскада. Эти параметры были оптимизированы с целью получения  $R_{OUT} = 50$  Ом на частоте 5 ГГц.

Результаты расчетов  $R_{OUT}$  и  $S_{22}$  (дБ)  $= 20 \lg S_{22}$  МШУ2 по методике, приведенной для МШУ1, даны в табл. 2.

Таблица 2

Частота, $f$ , ГГц	$R_{OUT}$ , Ом	$S_{22}$ , дБ
0,5	76	-13,7
2,0	70,12	-15,52
3,0	63,63	-18,42
5,0	50,23	-52,78
7,0	41,6	-20,75
9,0	38,35	-17,6
11,0	38,33	-17,6

Так же как в каскодном усилителе МШУ1, коэффициент шума МШУ2 зависит в основном от параметров входного транзистора Q1: базового сопротивления  $r_{b1}$ , проводимости  $g_{m2}$ , коэффициента усиления тока  $\beta_0$ . Существует оптимальное значение тока эмиттера (коллектора) SiGe-HBT в пределах 5–9 мА, соответствующее минимальному коэффициенту шума. В данной схеме эмиттерный ток Q1 равен 5,7 мА. Коэффициент шума МШУ2 следует ожидать в пределах 2,8–3,2 дБ в полосе частот.

Эмиттерные токи транзисторов Q2, Q4 равны, соответственно, 4,3 и 5,1 мА, а общий ток потребления равен 15,1 мА при напряжении питания  $V_{cc} = 3,3$  В.

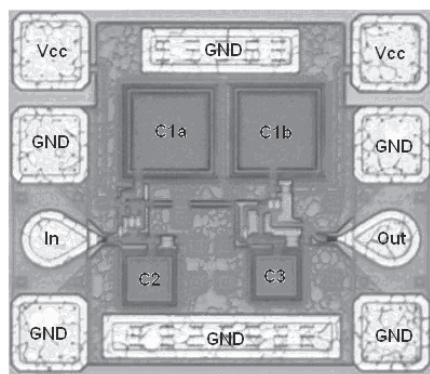


Рис. 12. Топологическая схема кристалла МШУ2

Топологическая схема кристалла МШУ2 представлена на **рис. 12** [14].

Топологическая реализация МШУ2, так же как и МШУ1, возможна, например, на основе технологии SiGe<sub>2</sub>-RF с минимальной шириной эмиттера 0,5 мкм. Отсутствие индуктивностей существенно уменьшает размер кристалла до 0,44×0,38 мм<sup>2</sup>.

\*\*\*

Таким образом, предложенные МШУ на основе SiGe HBT для СШП-систем имеют следующие характеристики: полоса пропускания МШУ1 0,5–5 ГГц, МШУ2 0,5–11 ГГц, коэффициент усиления, соответственно, 16,78 и 19,86 дБ. Реализация этих МШУ в виде интегральных схем возможна на основе SiGe HBT-технологий уровней 0,50, 0,25 или 0,13 мкм методом фаундри [9]. Фаундри-услуги предоставляют многие предприятия (фабрики кристаллов) Европы и Азии, например, фирмы Atmel и INP, Германия [16, 17].

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. FCC 02-48, ET Docket 98-153, First Report and Order, April 2002.
2. FCC 04-285, ET Docket 98-153, Second Report and Order and Second Memorandum Opinion and Order, December 2004.
3. Nekoogar F. Ultra-wideband communications: fundamentals and application // Pretic Hall, 2005.
4. Fernandes J. R., Wentzloff D. Recent advances in IR-UWB transceivers: an overview // ISCAS'10. — 2010. — P. 3284–3287.
5. Immoreev I., Teh-Ho Tao. UWB Radar for Patient Monitoring // IEEE A&E System Magazine. — 2008. — November — P. 11–18.
6. <http://uwbgroup.org/rus/>.
7. Aardal O., Hammerstad J. Medical radar literature overview, FFI-rapport. — 2010/00958. — P. 7–28.
8. Иммерев И. Я. Сверхширокополосные радары. Особенности и возможности // Радиотехника и электроника. — 2009. — Т. 54. — № 1. — С. 5–31. [Immoreev I. Ya. Radiotekhnika i elektronika. 2009. Vol. 54. N 1. P. 5]
9. Попов В. П., Вербицкий В. Г., Сидоренко В. П., Евтух А. А. Современные кремниевые технологии создания СВЧ интегральных микросхем диапазона 1–100 ГГц // Техника и приборы СВЧ. — 2009. — № 2. — С. 20–25. [Popov V. P., Verbitskii V. G., Sidorenko V. P., Evtuh A. A. Tekhnika i Pribory SVCh. 2009. N 2. P. 20]
10. Montana J.M. J. An Ultra-Wide-Band 1.0-11.6GHz LNA in 0.18μm CMOS. — [www.weble.ups.es/~jornet/JmJornet-UWB LNA](http://www.weble.ups.es/~jornet/JmJornet-UWB LNA)
11. Lee J., Cressler J. D. Analysis and design of an ultra-wideband low-noise amplifier using resistive feedback in SiGe

HBT technology // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. — 2006. — Vol. 54, N 3. — P. 1262–1268.

12. Desheng Ma, Dai F. F., Jaeger R. C., Irvin J. D. An X- and Ku-Band Wideband Recursive Receiver MMIC with Gain-Reuse // IEEE J. of Solid-State Circuits. — 2011. — Vol. 46, N 3. — P. 562–571.

13. Diddi V., Srivastava K. V., Biswas A. A 6 mW Low Noise Amplifier for 3.1-10.6 GHz UWB Application. — [www.ncc.org.in/download.php?f=NCC2011/1569358369.pdf](http://www.ncc.org.in/download.php?f=NCC2011/1569358369.pdf).

14. Dederer J., Trasser A., Schumacher H. Compact SiGe HBT low noise amplifiers for 3.1-10.6 GHz ultra-wideband applications. — [http://vts-ulm.de/docs/2009/6747/vts\\_6747\\_9299.pdf](http://vts-ulm.de/docs/2009/6747/vts_6747_9299.pdf).

15. Howard D. C., Poh J., Mukerjee T. S., Cressler J. D. A 3-20 GHz SiGe HBT ultra-wideband LNA with gain and return loss control for multiband wireless applications — <http://www.jazzsemi.com/publications/>.

16. Schueppen A., Berntgen J., Maier P. et al. An 80 GHz SiGe production technology // III-V Review. — 2001. — Vol. 14. — August. — P. 42–46.

17. <http://www.ihp-ffo.de/14.98.html>

Дата поступления рукописи  
в редакцию 23.02 2012 г.

#### Popov V.P., Sidorenko V.P. SiGe HBT low noise amplifiers for ultra-wideband systems.

*Key words: ultra-wideband systems (UWB), medical UWB radars, low-noise amplifiers, silicon-germanium heterojunction bipolar transistor (SiGe HBT), resistive feedback.*

This paper presents the principles of design of integrated circuits low-noise amplifiers (LNA) based on silicon-germanium heterojunction bipolar transistors (SiGe HBT) for ultra-wideband (UWB) systems. UWB systems range 0,5–10,6 GHz are used in communications, radars of medical applications and safety systems. The proposed UWB LNA implemented by inductorless or minimum number of inductors schemes. In this paper researched and designed two variants of UWB LNA 0,5–11 GHz frequency range.

Ukraine, Kiev, Institute of Microdevices of NASU.

#### Попов В.П., Сидоренко В.П., Малошумливі підсилювачі на основі SiGe HBT для надширокопосмугових систем.

*Ключові слова: надширокопосмугові (НШС) системи, НШС-радары медичного призначення, малошумливі підсилювачі, кремній-германієвий гетероперехідний біполярний транзистор, резистивні зворотні зв'язки.*

Розглянуто принципи побудови інтегральних схем малошумливих підсилювачів (МШП) на основі кремній-германієвих гетероперехідних біполярних транзисторів (SiGe HBT) для надширокопосмугових (НШС) систем. НШС-системи діапазону 0,5–10,6 ГГц застосовуються в галузі зв'язку, радарх медичного призначення та системах забезпечення безпеки. Запропоновані НШС МШП виконані за безіндуктивними електричними схемами або схемами з мінімальним числом індуктивностей. Проведено дослідження і розрахунки двох варіантів НШС МШП. Діапазон робочих частот — від 0,5 ГГц до 11 ГГц.

Україна, м. Київ, НДІ мікроприладів НТК «ІМК» НАНУ.



УДК 536.248.2

Е. С. АЛЕКСЕИК, к. т. н. В. Ю. КРАВЕЦ

Украина, г. Киев, НТУУ «Киевский политехнический институт»

E-mail: alexeik\_kpi@ukr.net

## СИСТЕМА ОТВОДА ТЕПЛОТЫ ОТ ТЕПЛОНАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РЭА НА ОСНОВЕ ПУЛЬСАЦИОННОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ

*Разработана компактная система отвода теплоты (СОТ) на основе пульсационной тепловой трубы с водой в качестве теплоносителя, работоспособная при любой ориентации в пространстве. В условиях вынужденной конвекции при отводимой мощности 120 Вт (160 Вт подводимой мощности) термическое сопротивление СОТ составляет 0,1 К/Вт и она обеспечивает среднюю температуру охлаждаемого объекта в диапазоне от 58 до 60°C. Теплопередающие характеристики СОТ могут быть улучшены, поскольку имеется потенциал для ее модифицирования.*

**Ключевые слова:** система отвода теплоты, пульсационная тепловая труба, теплопередающие характеристики.

Малые размеры современных электронных компонентов в совокупности с высокими мощностями тепловыделения приводят к необходимости отведения от них тепловых потоков значительных плотностей. Перспективным для решения этой задачи является использование пульсационных тепловых труб (ПТТ) [1, 2], отличающихся от обычных тепловых труб (ТТ) отсутствием капиллярной структуры, что значительно упрощает их конструкцию и изготовление. При этом по теплопередающим характеристикам ПТТ не уступают ТТ с капиллярной структурой.

Однако, несмотря на преимущества ПТТ, на данный момент существует весьма ограниченное количество конструкций систем отвода теплоты (СОТ) на ПТТ, и все они не лишены недостатков. Так, например, описанная в [3] СОТ рассчитана на работу при мощности тепловыделения до 60–70 Вт, что недостаточно для современных электронных компонентов (например, тепловыделение многоядерных центральных процессоров персональных компьютеров может достигать 130–140 Вт). Авторам же [4] не удалось запустить СОТ в положении против сил тяжести, когда ПТТ была заправлена водой, а в

случае заправки метанолом или фреонами СОТ в таком положении работала. Следует также отметить, что в основном во всех известных работах (например, [3–6]) в качестве теплоносителей использовались различные фреоны.

В настоящей работе предложена компактная СОТ на ПТТ, работоспособная при любой ориентации в пространстве при использовании воды в качестве теплоносителя, с теплопередающими характеристиками не хуже, чем у аналогичных конструкций на ПТТ и других видах ТТ.

### Конструкция системы теплоотвода

Основным элементом рассматриваемой системы отвода теплоты (рис. 1) является пульсационная тепловая труба замкнутого типа, изготовленная из медного капилляра внутренним диаметром 1 мм. Такой внутренний диаметр, согласно данным [7], обеспечивает работоспособность ПТТ при любой ориентации в гравитационном поле. Внешний диаметр капилляра составляет 2 мм.

Количество витков ПТТ было выбрано равным 24 исходя из ранее проведенных исследований [8–10], где показано, что увеличение количества витков приводит к уменьшению термического сопротивления ПТТ. Витки расположе-

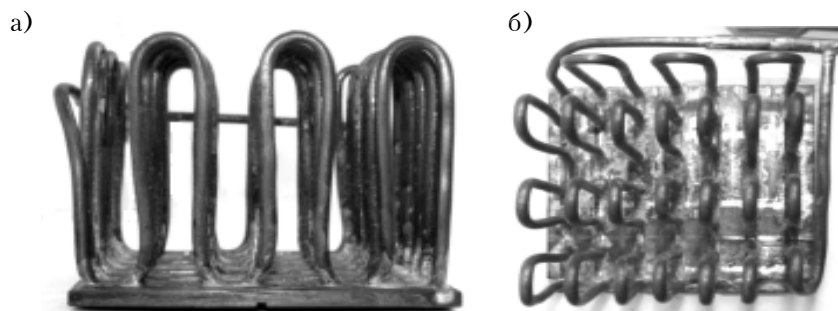


Рис. 1. Внешний вид СОТ на ПТТ: а — вид сбоку; б — вид сверху

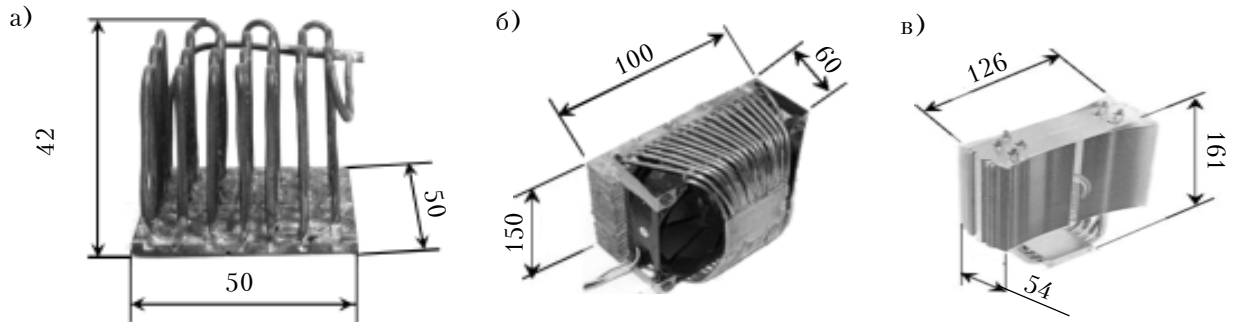


Рис. 2. Габаритные размеры (в мм) различных СОТ:

*a* — разработанная СОТ на ПТТ; *б* — СОТ на ПТТ Майданика Ю. Ф. и др. [4]; *в* — компьютерный куллер Thermalright True Spirit на обычных ТТ

ны таким образом (рис. 1, б), чтобы весь змеевик компактно помещался на основании размером 50×50 мм. В качестве основания использовалась медная пластина толщиной 3 мм. На одной из ее поверхностей были выфрезерованы канавки, в которые при помощи пайки устанавливалась ПТТ. Вторая поверхность была гладкой, к ней присоединялся охлаждаемый объект.

В качестве теплоносителя использовалась дистиллированная вода. Коэффициент заправки (отношение объема заправленной жидкости к общему объему ПТТ) составлял 50%.

Габаритные размеры СОТ — 50×50×42 мм — меньше, чем у аналогичных конструкций на ПТТ [4], а также у распространенных кулеров на обычных тепловых трубах для центральных процессоров персональных компьютеров (рис. 2).

#### Экспериментальная установка

Исследование теплопередающих характеристик рассматриваемой СОТ проводилось в условиях воздушного охлаждения при вынужденной и при естественной конвекции. Вынужденная конвекция рассматривалась, поскольку такой метод охлаждения является одним из наиболее распространенных в радиоэлектронной и компьютерной технике. Целью исследований в условиях естественной конвекции была провер-

ка возможности использования сконструированной СОТ в бесшумных системах охлаждения, т. е. системах, в которых отсутствуют вентиляторы и прочие движущиеся механические части, а также в различных герметичных устройствах, где невозможно организовать теплоотвод вынужденной конвекцией.

Исследование теплопередающих характеристик СОТ в условиях вынужденной конвекции проводилось на установке, схема которой приведена на рис. 3. СОТ 1 помещалась в рабочий участок аэродинамической трубы 3. Теплопровод к СОТ осуществлялся с помощью электронагревателя 12, имитировавшего теплонагруженный элемент. Для улучшения термического контакта между корпусом нагревателя и СОТ использовалась теплопроводная паста КПТ-8. Для уменьшения теплопотерь в окружающую среду нагреватель покрывался слоем теплоизоляции из базальтового волокна. Мощность на нагревателе регулировалась при помощи лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) 2 и контролировалась ваттметром 13. При проведении экспериментов она изменялась в пределах от 5 до 160 Вт, что полностью перекрывает диапазон тепловыделения современных центральных процессоров компьютеров, а также множества других полупроводниковых компонентов.

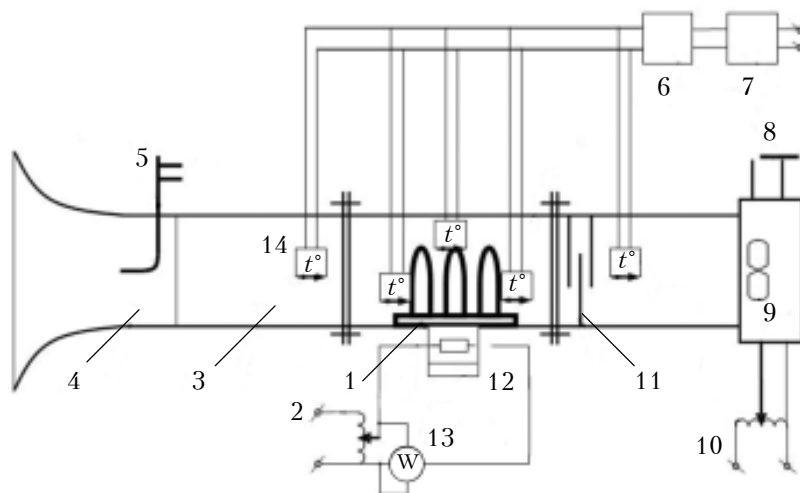


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для исследований в условиях вынужденной конвекции:

1 — СОТ; 2, 10 — ЛАТР; 3 — аэродинамическая труба; 4 — сопло Лаваля; 5 — трубка Пито—Прандтля; 6 — аналого-цифровой преобразователь; 7 — персональный компьютер; 8 — регулирующая заслонка; 9 — вентилятор; 11 — мешалка; 12 — электронагреватель; 13 — ваттметр; 14 — термопары

Поток охлаждающего воздуха в аэродинамической трубе создавался вентилятором 9. Скорость потока регулировалась при помощи ЛАТР 10 и заслонки 8, установленной на выхлопном патрубке вентилятора 9, и определялась по показаниям микроманометра, подключенного к трубке Пито — Прандтля 5, установленной во входном сечении аэродинамической трубы. При проведении опытов скорость потока изменялась от 4,2 до 9,4 м/с, что соответствует изменению расхода от  $13,3 \cdot 10^{-3}$  до  $29,5 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с. Такой диапазон охватывает расходы, обеспечиваемые современными вентиляторами, которые применяются для охлаждения компьютерной техники.

Для обеспечения равномерного поля скоростей на входе аэродинамической трубы было установлено сопло Лаваля 4.

Температура СОР измерялась четырнадцатью термопарами, установленными в три ряда по высоте СОР. Первый ряд состоял из четырех термопар, размещенных на основании СОР со стороны установки ПТТ. Второй и третий ряды, по пять термопар в каждом, находились в зоне конденсации ПТТ. Термопары второго ряда размещались на трубках определенных витков на расстоянии 19,5 мм от основания СОР, а термопары третьего ряда — на вершинах U-образных изгибов витков. Также были установлены две термопары на входе рабочего участка аэродинамической трубы и три на выходе для контроля средней входной и выходной температуры воздуха. По разности этих температур и расходу воздуха определялась величина передаваемого СОР теплового потока. Сигналы всех термопар через аналого-цифровой преобразователь 6 поступали на персональный компьютер 7. Установленное программное обеспечение позволяло отслеживать изменение показаний термопар в реальном времени и производить их запись. Для корректного измерения выходной температуры воздуха между выходом рабочего участка аэродинамической трубы и термопарами была установлена мешалка 11.

Для исследований в условиях естественной конвекции СОР помещалась в бокс, в котором обеспечивалось свободное движение воздушных масс, а сам бокс защищал СОР от внешних воздействий. При этом схема теплоподвода оставалась без изменений, элементы установки, связанные с аэродинамической трубой и контролем параметров потока воздуха, не использовались. В схему измерений была добавлена термопара на внешней поверхности тепловой изоляции нагревателя для учета теплопотерь в окружающую среду, а также ртутный термометр для контроля температуры окружающего воздуха.

Исследования проводились при различных положениях СОР. Опыты в условиях вынужденной конвекции производились при наиболее благоприятном для работы ПТТ вертикальном

положении СОР — с нагревом снизу, и в самом неблагоприятном — с нагревом сверху, а в условиях естественной конвекции — еще и в горизонтальном положении.

#### Методика проведения эксперимента

После установки СОР в определенное положение включались все системы и устанавливалась определенная скорость охлаждающего потока воздуха. Далее с помощью ЛАТР устанавливалась начальная мощность нагревателя  $Q_{\text{подв}}$ . После выхода на стационарный режим производилась запись показаний термопар в течение определенного промежутка времени, а также контролировались и записывались показания микроманометра. При проведении опыта подводимая мощность ( $Q_{\text{подв}}$ ) повышалась с фиксированным шагом и каждый раз в стационарном режиме производилась запись показаний термопар и микроманометра. При достижении  $Q_{\text{подв}} = 160$  Вт опыт прекращался.

Опыты в условиях естественной конвекции проводились аналогичным образом, за исключением установки и контроля параметров потока воздуха. Когда температура основания СОР достигала 180°C, предельного для использования теплопроводной пасты КПТ-8 значения, опыт прекращался.

#### Методика обработки экспериментальных данных

По показаниям термопар, полученным в ходе проведения экспериментов, определялись средняя температуры основания СОР ( $T_o$ ), зоны конденсации ПТТ ( $T_k$ ), воздуха на входе и выходе рабочего участка аэродинамической трубы ( $T_{\text{вх}}$ ,  $T_{\text{вых}}$ ), а также средняя температура нагревателя. Затем рассчитывался перепад температур по СОР

$$\Delta T = T_o - T_k. \quad (1)$$

По показаниям микроманометра определялась скорость потока во входном сечении аэродинамической трубы  $w_{\text{вх}}$ , которая использовалась для нахождения расхода охлаждающего воздуха в аэродинамической трубе:

$$G = \rho_v w_{\text{вх}} S_{\text{вх}}, \quad (2)$$

где  $\rho_v$  — плотность воздуха;

$S_{\text{вх}}$  — площадь входного сечения аэродинамической трубы.

Затем определялись отведенная СОР тепловая мощность  $Q_{\text{отв}}$  и ее термическое сопротивление  $R$ :

$$Q_{\text{отв}} = G c_p (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}); \quad (3)$$

$$R = \Delta T / Q_{\text{отв}}, \quad (4)$$

где  $c_p$  — изобарная теплоемкость воздуха.

В условиях естественной конвекции отведенная тепловая мощность рассчитывалась иначе:

$$Q_{\text{отв}} = Q_{\text{подв}} - Q_{\text{пот}}, \quad (5)$$

Входящие сюда тепловые потери с поверхности изоляции рассчитываются как

$$Q_{\text{пот}} = \alpha F_{\text{из}} (T_{\text{из}} - T_{\text{в}}),$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи с внешней поверхности изоляции к окружающему воздуху (определялся по критериальным зависимостям, приведенным в [14, с. 224]);

$F_{\text{из}}$  — площадь поверхности изоляции;  
 $T_{\text{из}}, T_{\text{в}}$  — средние температуры поверхности изоляции и воздуха соответственно.

### Результаты исследований

Одними из основных теплопередающих характеристик СОР являются ее термическое сопротивление и средняя температура охлаждаемого объекта, в нашем случае — средняя температура поверхности нагревателя, контактирующей с СОР ( $T_{\text{н}}$ ). Непосредственное измерение  $T_{\text{н}}$  не проводилось, однако было установлено, что перепад температур по толщине основания СОР не превышает  $0,1^\circ\text{C}$ , а перепадом температур по толщине слоя теплопроводной пасты между нагревателем и основанием СОР можно пренебречь. Поэтому в качестве средней температуры поверхности нагревателя принималась средняя температура поверхности основания СОР со стороны размещения ПТТ.

Как видно на рис. 4, а, б с увеличением отводимой мощности термическое сопротивление  $R$  снижается, причем положение СОР в пространстве, способ охлаждения и скорость охлаждающего потока в случае вынужденной конвекции не влияют на характер его изменения.

В условиях вынужденной конвекции изменение скорости охлаждающего потока от 6 до  $9,4 \text{ м/с}$  не влияет на величину  $R$  при любой ориентации СОР в пространстве, но сама ориентация оказывает определенное влияние: при нагреве сверху  $R$  в  $1,5\text{--}2$  раза выше, чем при нагреве снизу (рис. 4, а). Однако и в одном, и в другом случае оно достаточно мало, т. е. данная СОР будет эффективной для охлаждения теплонагруженных элементов радиоэлектронной аппаратуры.

При естественной конвекции термическое сопротивление в случае нагрева сверху в  $3\text{--}5$  раз выше, чем при нагреве снизу (рис. 4, б), а теплопередающие характеристики СОР в горизонтальном положении занимают промежуточное положение между этими двумя.

Как видно из рис. 4, в, средняя температура охлаждаемого объекта линейно возрастает с увеличением отводимой мощности. На характер изменения этой температуры, как и в случае с термическим сопротивлением, не влияет способ охлаждения, ориентация в пространстве СОР и скорость охлаждающего потока.

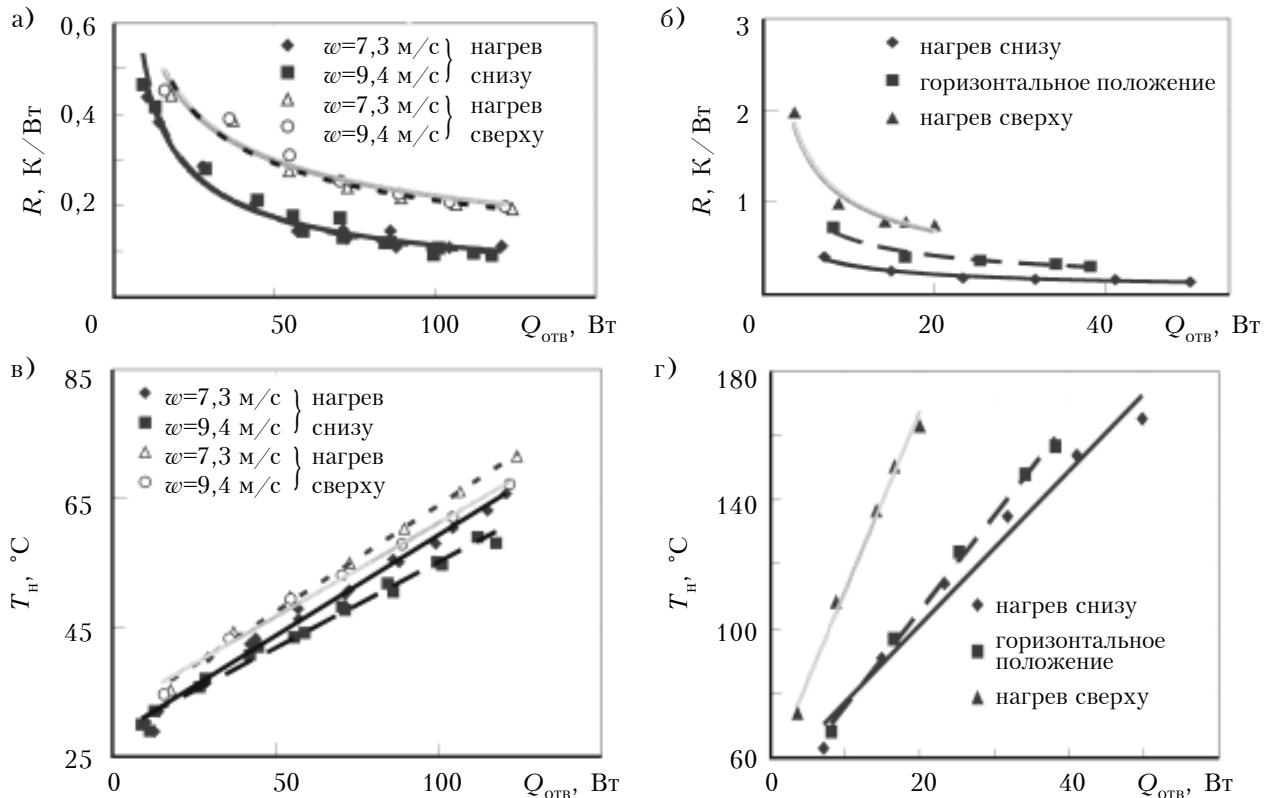


Рис. 4. Зависимость термического сопротивления СОР (а, б) и средней температуры охлаждаемого объекта (в, г) от отводимой тепловой мощности в условиях вынужденной (а, в) и естественной (б, г) конвекции



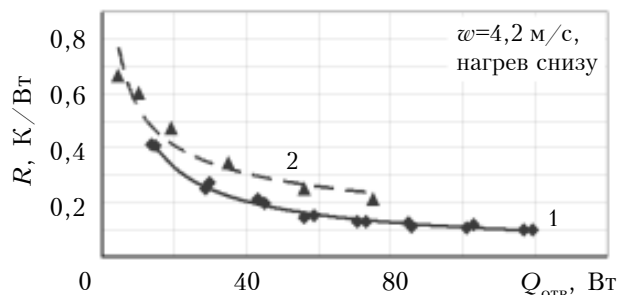


Рис. 5. Термическое сопротивление разработанной СОТ на ПТТ (1) и СОТ на МТТ [11, 12] (2)

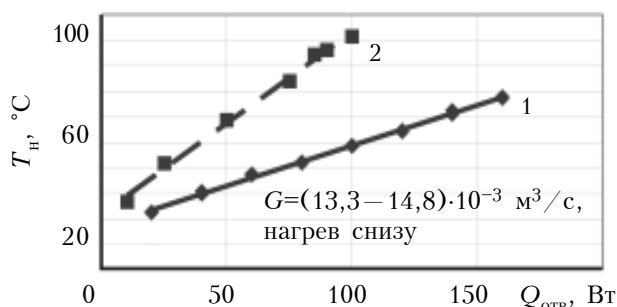


Рис. 6. Зависимость средней температуры охлаждаемого объекта от  $Q_{отв}$  разработанной СОТ на ПТТ (1) и СОТ на ПТТ Майданника Ю. Ф. и др. [4] (2)

В условиях вынужденной конвекции при нагреве сверху температура была несколько выше, чем при нагреве снизу, а увеличение скорости потока приводило к уменьшению средней температуры охлаждаемого объекта в обоих случаях. Это наблюдалось во всем диапазоне изменения отводимой мощности от 5 до 120 Вт. Минимальная температура при отводимой мощности 120 Вт была достигнута при скорости охлаждающего потока 9,4 м/с и составляла 58,1°C при нагреве снизу и 67,3°C при нагреве сверху.

В случае естественной конвекции наименьшие значения  $T_n$  также наблюдались при нагреве снизу, а наивысшие — при нагреве сверху, однако находились они в диапазоне 60–170°C при отводимых мощностях 5–50 Вт, что неприемлемо для большинства электронных компонентов с тепловыделением до 100–150 Вт.

Теплопередающие характеристики рассматриваемой СОТ в условиях вынужденной конвекции сравнивались с характеристиками СОТ на ПТТ, описанных в литературе, СОТ на миниатюрных тепловых трубах (МТТ) и кулеров на обычных ТТ для центральных процессоров ПК.

Из рис. 5 видно, что термическое сопротивление разработанной СОТ на ПТТ на 25–40% ниже, чем у СОТ на МТТ [11, 12], при большей отводимой тепловой мощности.

По своим теплопередающим характеристикам исследуемая СОТ превосходит также СОТ на ПТТ, описанные в литературе. В качестве примера на рис. 6 представлены средние температуры охлаждаемого объекта при использовании

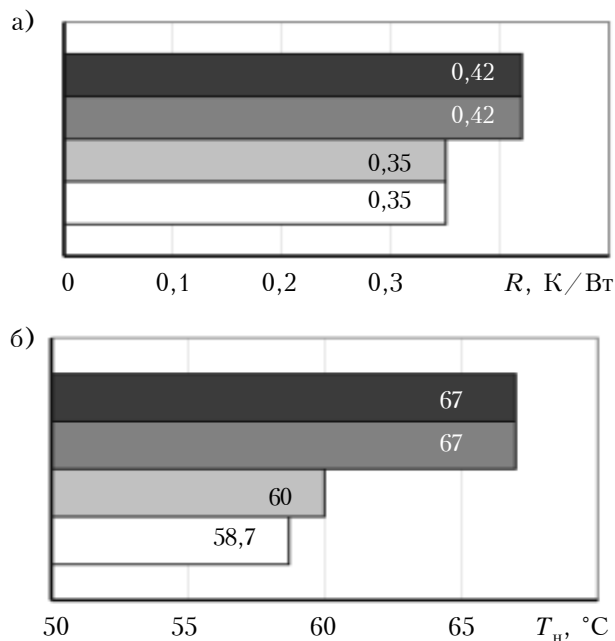


Рис. 7. Термическое сопротивление «охлаждаемый объект — воздух» (а) и средняя температура охлаждаемого объекта (б) для разработанной СОТ (□) на ПТТ и для кулеров центральных процессоров ПК [13]:

■ Thermaltake Slim X3; ■ Intel i-5 2400 boxed cooler; □ Cooler Master Hyper 101

рассматриваемой СОТ и СОТ на ПТТ, описанной в [4], для различных значений подводимой мощности. Здесь видно, что при подводимой мощности 100 Вт температура охлаждаемого объекта при использовании СОТ [4] составляет приблизительно 100–101°C, в то время как разработанная СОТ при той же мощности обеспечивает температуру 59–60°C.

Сравнение рассматриваемой СОТ на ПТТ с кулерами на обычных ТТ для центральных процессоров ПК [13] производилось по следующим параметрам: термическое сопротивление теплопередачи от охлаждаемого объекта к воздуху и средняя температура охлаждаемого объекта. Результаты сравнения приведены на рис. 7 (данные получены в условиях вынужденной конвекции при подводимой мощности 150–160 Вт и расходе воздуха  $(12,2 - 13,3) \cdot 10^{-3}$  м³/с). Из рисунка видно, что термическое сопротивление «охлаждаемый объект — воздух» исследуемой СОТ меньше или такое же, как и у серийно выпускаемых кулеров на обычных ТТ, и при этом обеспечивается более низкая температура охлаждаемого объекта.

Следует отметить, что одним из факторов, обеспечивающих высокие теплопередающие характеристики кулеров для процессоров, является значительная площадь оребрения зон конденсации ТТ. В то же время, при использовании ПТТ аналогичные, а в ряде случаев и лучшие параметры были получены без оребрения. Это свидетельствует о том, что теплопередающие характеристики собственно ПТТ, примененной в

исследуемой СОТ, выше, чем у ТТ, используемых в серийно выпускаемых кулерах.

### Заключение

Теплопередающие характеристики разработанной системы отвода теплоты указывают на то, что она может быть использована для эффективного охлаждения теплонагруженных элементов радиоэлектронной и компьютерной техники в условиях вынужденной конвекции при любой ее ориентации в пространстве. При отводимой мощности  $Q_{\text{отв}} = 5 - 120$  Вт (что соответствует подводимой мощности 10 – 160 Вт) термическое сопротивление СОТ находится в пределах 0,5 – 0,1 К/Вт, а при  $Q_{\text{отв}} = 120$  Вт СОТ может обеспечить среднюю температуру охлаждаемого объекта 58 – 67°C.

В условиях естественной конвекции теплопередающие характеристики СОТ значительно ухудшаются, поэтому ее использование в таких условиях нецелесообразно.

Представленная СОТ обладает лучшими теплопередающими характеристиками и меньшими габаритами по сравнению с известными аналогичными системами на ПТТ, МТТ, а также серийно выпускаемыми кулерами на ТТ для центральных процессоров персональных компьютеров. К тому же, они могут быть еще улучшены, поскольку СОТ на ПТТ имеет потенциал для модифицирования (например, оребрение зоны конденсации ПТТ).

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кузнецов И.О., Смирнов Г.Ф. Экспериментальное и математическое моделирование характеристик пульсационных тепловых труб (ПТТ) // Холодильная техника и технология. – 2005. – №5. – С. 61-69. [Kuznetsov I.O., Smirnov G.F. // Kholodil'naya tekhnika i tekhnologiya. 2005. N 5. P. 61]
2. Дмитрин В.И., Майданик Ю.Ф., Пастухов В.Г. Разработка и исследование компактного охладителя на основе осциллирующей тепловой трубы // Теплофизика высоких температур. – 2010. – Т. 48. – №4. – С. 592–599. [Dmitrin V.I., Maidanik Yu.F., Pastukhov V.G. // Teplofizika vysokikh temperatur. 2010. Vol. 48. N 4. P. 592]
3. Rittidech S., Boonyaem A., Tipnet P. CPU Cooling of Desktop PC by Closed-end Oscillating Heat-pipe (CEOHP) // American Journal of Applied Sciences. – 2005. – N 2 (12). – P. 1574–1577.
4. Maidanik Yu.F., Dmitrin V.I., Pastukhov V.G. Compact cooler for electronics on the basis of a pulsating heat pipe // Applied Thermal Engineering. – 2009. – Vol. 29. – P. 3511–3517.
5. Gi K., Maezawa S., Kojima Y., Yamazaki N. CPU cooling of notebook PC by oscillating heat pipe // 11th International Heat Pipe Conf. – Japan, Tokyo. – 1999. – P. 469–472.
6. Miyazaki Y. Flexible oscillating heat pipes for cooling of notebook PCs // 8th International Heat Pipe Symp. – Kumamoto (Japan). – 2006 – P. 226–230.
7. Yang H., Khandekar S., Groll M. Operational limit of closed loop pulsating heat pipes // Applied Thermal Engineering. – 2008. – vol. 28. – P. 49–59.
8. Кравец В.Ю., Алексеик Е.С. Влияние количества витков на теплопередающие характеристики пульсационных тепловых труб // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – №6/7. – С. 59-63. [Kravets V.Yu., Alekseik E.S. // Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii. 2010. N 6/7. Vol. 59]
9. Алексеик Е.С., Кравец В.Ю. Зависимость теплопередающих характеристик пульсационных тепловых труб от количе-

ства витков и угла наклона // Тр. 12-й Междунар. науч.-практич. конф. «СИЭТ-2011». – Украина, Одесса. – 2011. – С. 228. [Alekseik E.S., Kravets V.Yu. // Tr. 12-i Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. «SIET-2011». Ukraina, Odessa. 2011. P. 228]

10. Кравец В.Ю., Алексеик Е.С., Аполлонина А.Ю. Влияние количества витков на термическое сопротивление пульсационных тепловых труб // Восточно-Европейский журнал передовых технологий – 2012. – №2/8. – С. 54-57. [Kravets V.Yu., Alekseik E.S., Apollonina A.Yu. // Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii. 2012. N 2/8. P. 54]

11. Пат. ПМ 3525 Украины. Радиатор / В.Ю. Кравец, А.Я. Паламарчук, А.И. Руденко, Ю.Е. Николаенко. – 15.11.2004. [Pat. PM 3525 Ukrainy / V.Yu. Kravets, A.Ya. Palamarchuk, A.I. Rudenko, Yu.E. Nikolaenko. 15.11.2004]

12. Кравец В.Ю., Николаенко Ю.Е., Руденко А.И. и др. Радиатор на основе миниатюрных тепловых труб // Тр. 5-й Междунар. научн.-практич. конф. «СИЭТ-2004». – Одесса – 2004 – С. 193. [Kravets V.Yu., Nikolaenko Yu.E., Rudenko A.I. i dr. // Tr. 5-i Mezhdunar. nauchn.praktich. konf. «SIET-2004». Odessa 2004 P. 193]

13. <http://www.ixbt.com/cpu/thermaltake-slimx3.shtml>.

14. Исаченко В.П. Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – Москва – Ленинград: Энергия, 1965. [Isachenko V.P. Osipova V.A., Sukomel A.S. Teploperedacha. Moscow – Leningrad: Energiya, 1965]

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 09.08 2012 г.*

Alekseik E. S., Kravets V. Yu. **Oscillating heat pipe cooler for heat-generating elements of electronics.**

*Key words: cooler, oscillating heat pipe, heat transfer capabilities.*

The article presents a newly-developed compact heat removal system (HRS) with water used for coolant, operable in any position in space. In conditions of forced convection at output power of 120 Wt (160 Wt input power) thermal resistance of the HRS is 0.1 K/Wt and the system provides the average temperature of the cooled object over the range of 58 to 60°C. Heat transfer characteristics of the HRS can be improved, as there is potential for its modification.

Ukraine, NTUU "Kyiv polytechnical institute".

Алексеик Є.С., Кравець В.Ю. **Система відводу теплоти від теплонавантажених елементів РЕА на основі пульсаційної теплової труби.**

*Ключові слова: система відводу теплоти, пульсаційна теплова труба, теплопередавальні характеристики.*

Розроблено компактну систему відводу теплоти (СВТ) на основі пульсаційної теплової труби з водою як теплоносієм, працездатну при будь-якій орієнтації в просторі. В умовах вимушеної конвекції при потужності, що відводиться, 120 Вт (160 Вт потужності, що підводиться) термічний опір СВТ становить 0,1 К/Вт і вона забезпечує середню температуру охолоджуваного об'єкта в діапазоні від 58 до 60°C. Теплопередавальні характеристики СВТ можуть бути поліпшені, оскільки є потенціал для її модифікування.

Україна, НТУУ «Київський політехнічний інститут».

УДК 621.328.2

К. т. н. Я. Я. КУДРИК<sup>1</sup>, Р. И. БИГУН<sup>2</sup>, Р. Я. КУДРИК<sup>2</sup>Украина, г. Киев, <sup>1</sup>Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ;<sup>2</sup>Львовский национальный университет им. И. Я. Франко

E-mail: Bh\_@mail.ru

## ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНТАКТОВ К КАРБИДУ КРЕМНИЯ

Систематизированы имеющиеся в различных публикациях результаты исследований удельного сопротивления омических контактов к карбиду кремния, изготовленных без какой-либо модификации поверхности полупроводника. Проведен анализ группы контактов с наилучшими параметрами, и на основе его результатов даны рекомендации по оптимальным контактообразующим слоям для р- и n-типов SiC политипов 4H, 6H, 3C, 15R, 21R.

Ключевые слова: омический контакт, SiC.

В последние десятилетия началось бурное развитие широкозонной электроники [1–6], находящей применение в области высоких мощностей (системы контроля двигателя электромобилей, конверторы электроэнергии), высоких напряжений (электроэнергетика), высоких удельных мощностей (миниатюрные системы питания, аэрокосмическая электроника), высоких температур (для датчиков и более экономичного управления сгоранием в двигателях реактивных самолетов и автомобилей), микроволновой (радиолокация и

связь), радиационно стойкой (электроника военного назначения) аппаратуры и оптоэлектроники. Основные параметры полупроводниковых материалов приведены в **табл. 1**.

Для анализа перспективности использования полупроводникового материала в микроэлектронике часто используют специальные критерии качества полупроводника — параметры, характеризующие эффективность применения полупроводника в определенной области микроэлектроники [9]. В **табл. 2** приведены следующие

Таблица 1

Параметры полупроводниковых материалов при 300 К [1, 7, 8]

Параметр	Si	GaAs	3H SiC	4H SiC	6H SiC	GaN	Алмаз
Ширина запрещенной зоны, $E_g$ , эВ	1,12	1,43	2,3	3,26	3,03	3,4	5,5
Критическая напряженность электрического поля, $E_c$ , $10^6$ В/см	0,29	0,4	2	2,4	2,5	3,3	10
Подвижность электронов, $\mu_n$ , $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	1350	8500	1000	880	400	1000	2200
Подвижность дырок, $\mu_p$ , $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	490	400		80	120	30	1800
Дрейфовая скорость насыщения, $v_{sat}$ , $10^7$ см/с	1	2	2,5	2	2	2,5	1,5
Теплопроводность, $\lambda$ , Вт/(см·К)	1,3	0,55	4	4	4	1,3	7
Диэлектрическая проницаемость, $\epsilon_s$	11,7	12,8	9,72	9,7	9,66	8,9	5,7
Температура Дебая, К	645	360	1200	1300	1200	600	1860

Таблица 2

Основные критерии качества некоторых широкозонных полупроводников, нормированные по кремнию [1, 7, 10]

Критерий	Si	GaAs	3C SiC	4H SiC	6H SiC	GaN	Алмаз
$JM$	1	8	297	274	297	809	2675
$KM$	1	0,6	5,3	4,8	4,8	1,8	9,4
$BM$	1	18	200	306	157	830	33000
$QF1$	1	7,6	620	940	480	830	175000
$QF2$	1	10,5	4280	7800	4160	9400	$6\cdot 10^6$
$BHFM$	1	12	35,2	44,6	22	96	1900

щие критерии качества для ряда широкозонных полупроводников:

$JM$  — критерий качества Джонсона, определяющий рабочий предел производительности прибора (мощность и частота),  $JM = (E_c v_{sat} / \pi)^2$ ;

$KM$  — критерий качества Кейеса, в котором учитывается скорость переключения транзистора при работе в качестве логического элемента микропроцессора,  $KM = \lambda(v_{sat} / \epsilon_s)^{1/2}$ ;

$BM$  — критерий Балига для оценки полупроводникового материала, связанный с потерями при работе мощных полевых транзисторов. Применим для оценки возможностей полупроводника с точки зрения его использования в низкочастотных приборах,  $BM = \sigma_A = \epsilon_s \mu E_c^3$ ;

$QF1$  — критерий качества, учитывающий термические свойства полупроводника, функционирующего в активной зоне мощного прибора (термический  $KM$ ),  $QF1 = \lambda \sigma_A$ ;

$QF2$  — критерий качества, учитывающий термические свойства полупроводника в предположении, что теплоотвод идеален,  $QF2 = \lambda \sigma_A E_c$ ;

$BHFM$  — критерий Балига для оценки возможностей полупроводника с точки зрения его использования в высокочастотных приборах с учетом потерь, связанных с переключениями,  $BHFM = \mu E_c^2$ .

Из табл. 1, 2 видно, что к наиболее перспективным полупроводниковым материалам для разработки элементной базы силовой электроники относятся алмаз, карбид кремния и нитрид галлия, которые превосходят кремний и арсенид галлия по всей совокупности физических и химических свойств: тепловой и радиационной стойкости, механической прочности, химической инертности, электрической прочности, предельной скорости дрейфа носителей тока, теплопроводности и т. д.

При разработке и изготовлении приборов на карбиде кремния возникает множество конструктивных и технологических проблем, решение которых позволит реализовать все преимущества карбида кремния на практике. Одной из таких технологических проблем является технология формирования омических контактов как к  $p^+$ - и  $n^+$ -областям, так и к слаболегированному карбиду кремния.

Из около 170 известных политипов SiC только три широко исследуются с целью создания к ним омических контактов — 3C, 4H и 6H (рис. 1). Из представленного на рис. 2 графика видно, что в последние годы резко возросло число

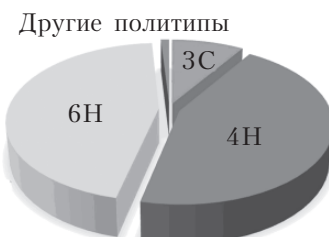


Рис. 1. Соотношение количества опубликованных результатов по омическим контактам к разным политипам карбида кремния (по данным более 100 сообщений)

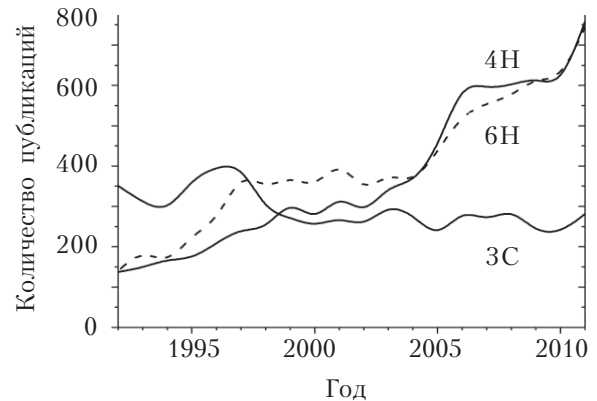


Рис. 2. Динамика количества опубликованных работ по разным политипам карбида кремния (по данным библиотеки [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com))

публикаций, посвященных политипам 6H и 4H (за последние шесть лет количество публикаций на эту тему увеличилось почти вдвое), и несмотря на несколько лучшие параметры 4H SiC, интерес исследователей практически одинаков к обоим политипам.

Разработке технологии изготовления омических контактов к карбиду кремния посвящено довольно большое количество работ, в них показана возможность использования в качестве материала для контактов целого ряда металлов, сплавов и соединений. Однако даже при использовании одинаковых контактных систем на полупроводниковых пластинах одинакового политипа и легирования экспериментальные результаты, полученные разными авторами, существенно различаются из-за разной технологии изготовления контактов. Поэтому провести обработку и систематизацию всех имеющихся данных с целью определения оптимальных материалов и параметров изготовления контакта для конкретных технологических задач весьма затруднительно. Попытки решить эту проблему производились неоднократно [11–15], однако к сегодняшнему дню появилось много нового фактологического материала, позволяющего по-новому взглянуть на процесс и механизмы формирования омического контакта.

Цель данной работы — выработать рекомендации по выбору оптимальных материалов металлизации и технологии изготовления омического контакта к карбиду кремния как перспективных, так и малоизученных политипов на основе обобщения имеющихся литературных данных.

### БАЗОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ К КАРБИДУ КРЕМНИЯ

Рассмотрим основные процессы базовой технологии, такие как подготовка поверхности полупроводниковой пластины, послойное нанесение контакта и его отжиг.



Способы, применяющиеся для очистки подложек SiC и снятия SiO<sub>2</sub> [7, 17]

Смесь (объемное соотношение)	T, °C	Время	Название
H <sub>2</sub> O:NH <sub>4</sub> OH:H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (5:1:1)	75	5 мин	RCA SC1
H <sub>2</sub> O:HCl:H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (5:1:1)	75	5 мин	RCA SC2
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> :H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (2.5:1)	100	5 мин	Seven-up
H <sub>2</sub> O:HF:CH <sub>3</sub> CH(OH)CH <sub>3</sub> (100:3:1)	25	100 с	IMEC
HCl:HN <sub>3</sub> (3:1)	50	5 мин	Царская водка
HF:H <sub>2</sub> O(1:10)	25	*	Раствор HF (DHF)
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> :H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (4:1)	120	*	Piranha
HF:NH <sub>4</sub> F (1:7)	25	*	BHF
BHF+NH <sub>4</sub> OH	25	*	pH-модификат BHF (pH 12)

Примечание: \* — нет данных

**Подготовка полупроводниковой пластины**

Обычно подготовка полупроводниковой пластины состоит в предварительной очистке ее по RCA-методике (фирмы RCA) или по методике Хуанга [16] (те же растворы, но удвоенное время экспозиции) (табл. 3). Методика RCA — стандартный набор технологических операций по очистке полупроводниковых пластин, включающий три этапа: удаление органических загрязнений (SC1), удаление оксидов (SC2) и удаление ионных остатков (SC3).

Травление буферного оксида (buffered oxide etch, BOE) чаще всего производят в смеси BHF (см. табл. 3). Перед снятием буферного оксида возможно нанесение фоторезиста. Следующим этапом очистки служит промывка в деионизированной воде (DI) и сушка в потоке азота, после чего пластина загружается в вакуумную камеру.

В табл. 4 собраны данные по различным методикам подготовки поверхности и нанесения металлизации в процессе изготовления контактов хорошего качества (критерии сформулированы ниже).

Качество подготовки полупроводниковой пластины перед нанесением металлизации может определять параметры сформированного омического контакта, особенно при пониженных температурах термического отжига [42–49].

**Нанесение контактной металлизации**

В зависимости от назначения контакта и требований к его параметрам он может состоять из одного или нескольких слоев, различающихся функционально:

*подлегирующий слой* — тонкий слой между полупроводником и контактообразующим слоем, атомы которого диффундируют в процессе отжига и создают в приповерхностном слое полупроводника повышенную концентрацию примеси для стимулирования туннельного механизма токопереноса в контакте и, как следствие, снижения контактного сопротивления;

*контактообразующий слой* — слой металла, сплава или соединения, формирующий потенциальный барьер с полупроводником;

*адгезионный слой* — тонкий, обычно металлический, слой между антидиффузионным слоем и контактообразующим либо между контактообразующим и внешним слоями металлизации, служит для повышения взаимной смачиваемости наносимых слоев и для повышения механической прочности контакта, предупреждая расслоение;

*антидиффузионный слой* — предупреждает взаимную диффузию контактообразующего слоя и внешней металлизации [50];

*слой внешней металлизации* — служит для создания межсоединений, выводов и пр.

Нанесение металлизации производят послойно магнетронным или электронно-лучевым распылением мишени, реже — термическим испарением (табл. 4).

**Отжиг**

Завершающим этапом формирования омического контакта служит отжиг при температуре  $T_{отж}$ , производимый в основном в вакууме, в разреженной инертной или в слегка восстановительной атмосфере.

Преимущественно для формирования контактов используют термическую обработку длительностью от 1 до 15 мин (рис. 3). Время термообработки  $\tau_{отж}$  выбирается из компромисса между продолжительностью производственного цикла и разбросом параметров контактов между партиями.

Ниже приведем данные по наиболее удачным омическим контактам к каждому из полупроводников.

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ**

Основными характеристиками омического контакта являются удельное контактное сопротивление и его температурная зависимость, макси-

Данные по различным методикам изготовления контактов

Метод нанесения (атмосфера)	Давление, Торр	Подготовка поверхности	Источник
RF (Ar)	$5 \cdot 10^{-7}$ b.p.	DHF	[18]
e-beam	$1 \cdot 10^{-6}$ b.p.	КОН, сублимационное травление	[19]
e-beam	$1 \cdot 10^{-8}$ b.p.		[20]
RF (Ar, N <sub>2</sub> )	$4 \cdot 10^{-3}$ tot.		[21]
RF (Ar, N <sub>2</sub> )	$4 \cdot 10^{-3}$ tot.		[22]
		Ацетон, метанол, DI	[23]
DC		RCA, окисление при 1150°C, DHF	[24]
th. evapor.	$1 \cdot 10^{-6}$ b.p.	Ацетон, серная кислота, RCA	[25]
e-beam		RCA, piranha	[26]
e-beam		Seven-up, IMEC, DI, сушка в N <sub>2</sub>	[27]
DC	$5 \cdot 10^{-7}$ b.p.	Seven-up, IMEC, DI, сушка в N <sub>2</sub>	[28]
e-beam	$1 \cdot 10^{-9}$ b.p.	RCA SC1, RCA SC2, DHF	[29]
e-beam		Piranha, DI, RCA	[30]
		Piranha, RCA, BOE	[31]
e-beam		Растворители органики, DI, DHF (2 мин), RCA	[32]
e-beam	$1 \cdot 10^{-6}$ b.p.	Химическая очистка, DHF	[33]
RF		Трихлорэтан, ацетон, метанол, DI, RCA SC1 (10 мин), RCA SC2 (10 мин при 70°C), BOE (2 мин), DI	[34]
e-beam	$2 \cdot 10^{-7}$ b.p.		[35]
e-beam	$5 \cdot 10^{-8}$ b.p.		[36]
RF	$1 \cdot 10^{-7}$ b.p.	RCA SC1 (10 мин.), RCA SC2 (10 мин), BOE, DI	[37]
magnetron	$7 \cdot 10^{-3}$ tot.		[38]
	$3 \cdot 10^{-10}$ b.p.	Seven-up (5 мин при 80°C), IMEC, DI, HF:HNO <sub>3</sub> (1:1) (1 мин), DI	[39]
DC	$3 \cdot 10^{-7}$ b.p.	Ацетон (5 мин), метанол (5 мин), DHF (10 мин), DI, сушка в N <sub>2</sub>	[40]
e-beam	$2 \cdot 10^{-6}$ b.p.	RCA-подобная обработка	[41]
e-beam	$10^{-6}$ b.p.	RCA, сушка, окисление (60 мин при 1150°C), DHF (1 мин)	[42]
th. evapor.			
		Травление в КОН	[43]

Примечания: b.p. (base pressure) — давление в камере до начала распыления; tot. — общее давление в процессе распыления; RF, DC — магнетронное нанесение контакта с приложением переменного и постоянного напряжения соответственно; magnetron — магнетронное нанесение контакта, если тип магнетронного распыления не указан; e-beam — электронно-лучевое распыление мишени; th. evapor. — нанесение контакта термическим испарением

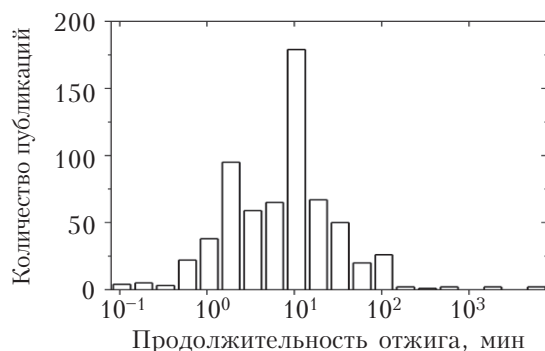


Рис. 3. Гистограмма распределения количества обработанных сообщений о сформированных омических контактах к карбиду кремния по времени термического отжига

мальная рабочая температура, стойкость к радиационным, химическим, механическим и прочим факторам деградации, воздействующим на контакт в процессе его работы. Для определения величины удельного контактного сопротивления используют модификации метода длинной линии (TLM): линейный TLM, TLM с отдельными токовыми контактами, TLM с «плавающим» контактом (FC TLM), радиальный TLM (CTLM) и его модификации — CTLM с коаксиально вложенными контактами (CTLM соax). Также используют четырехточечный метод, метод Кокса — Стрека и другие методы, подробное описание которых (включая фотошаблоны и формулы расчета) приведены [51].

#### Омические контакты к карбиду кремния $n$ -типа

##### $n$ -4H SiC

В качестве материалов для контактообразующих слоев (контактообразующий + подлегирующий) омических контактов к  $n$ -4H SiC в основном используется никель и его соединения, реже Ti, Al. На рис. 4 собраны данные по удельному сопротивлению для разных контактных металлизаций, полученных различными методами нанесения и термической обработки.

Эмпирически было определено, что зависимость удельного контактного сопротивления оми-

ческих контактов к полупроводникам от степени их легирования имеет обратную корневую зависимость [52], график которой в логарифмических координатах представляет собой прямую с отрицательным коэффициентом наклона. Теоретические модели минимально достижимого предела удельного контактного сопротивления при определенных механизмах токопереноса [52–54] подтверждают такой характер эмпирической зависимости.

В дальнейшем анализе будем рассматривать контакты с сопротивлением ниже эмпирической зависимости (показана пунктиром на рис. 4), называя их контактами хорошего качества, для определения необходимых параметров обработки полупроводниковой пластины, параметров нанесения и видов контактной металлизации.

Как следует из рис. 4, на момент написания обзора лучшие омические контакты в широком диапазоне концентраций легирования полупроводника — это те, что получены на основе Ni, NiCr, NiSi<sub>x</sub> или с использованием графитизации поверхности [23, 55] с последующим нанесением Ni. При высоких концентрациях легирования полупроводника хорошие омические контакты получают с контактной металлизацией на основе Ti, AlTi и силицидов кобальта и тантала (табл. 5).

Попытки улучшения омического контакта на основе никеля к 4H SiC идут в нескольких направлениях. Например, если предположить, что основную роль в формировании контакта играют силицидные фазы, то можно предложить использование готовых силицидов или мультислоев Si/Ni [16, 20, 21, 35, 55–61, 77, 78]. Однако, как показали исследования, хороший омический контакт получается только когда кремния в мультислоях недостаточно для стехиометрического состава Ni<sub>2</sub>Si. Возможно, это объясняется существенной ролью вакансий кремния в процессе формирования контакта [79–81] или присутствием на границе раздела углеродной нанокристаллической фазы. С другой стороны, температурная стабильность контактов на основе силицидов выше остальных [82, 83] за счет менее интенсивных межфазных реакций и, как следствие, более резкой границы раздела «контактная металлизация — полупроводник».

Также на основе идеи о том, что ответственной за формирование омического контакта является углеродная нанокристаллическая фаза [23, 60, 68, 84–88], предложено формировать контакт на основе углеродного контактообразующего слоя [23]. При этом тоже были получе-

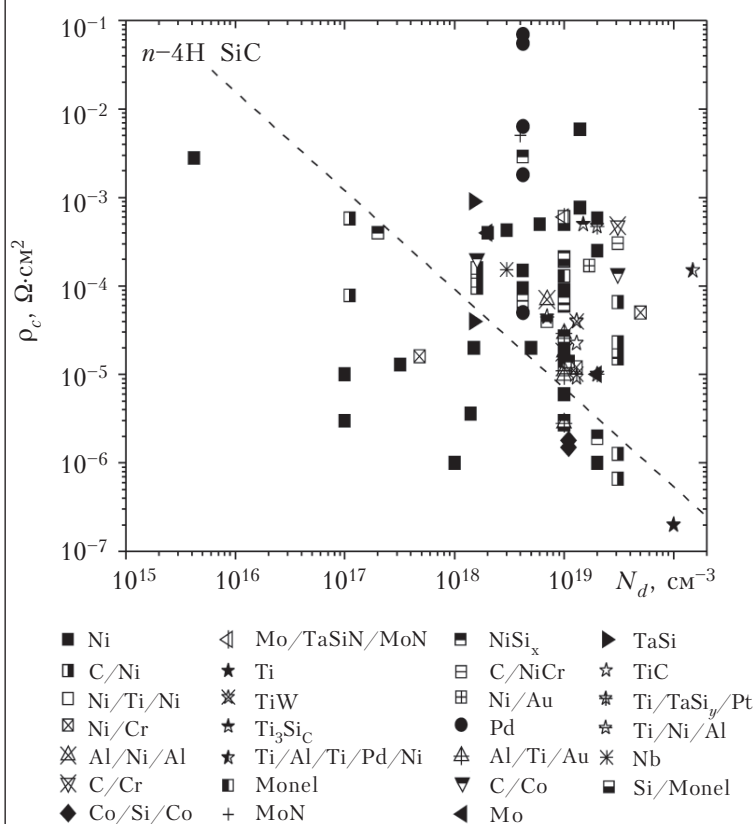


Рис. 4. Приведенные в [7, 16, 20, 21, 23, 24, 26, 32, 34, 35, 55–76] удельные сопротивления контактов к  $n$ -4H SiC при различных концентрациях легирования полупроводника

Таблица 5

Характеристики омических контактов хорошего качества к 4H SiC

Контакт	$N_d$ , $10^{17} \text{ см}^{-3}$	$T_{\text{отж}}$ , $^{\circ}\text{C}$	$\tau_{\text{отж}}$ , мин	$\rho_c$ , $10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$	Источник
Al/Ti/Au	100	1050	5	2,80	[24]
C/Ni	310	800	120	0,66*	[55]
	1,1	1000		580*	
	310	700	120	1,26	[23]
	1,1	900		78,5	
Co/Si/Co	110	800	3	1,5	[35]
			5	1,8	[57]
Ni	100	950	10	2,8	[20]
				3,0	[56]
				2,8	[57]
	1,0	950	н. д.	3,0	[34]
	200			1,0	[62]
	14			3,6	
	3,2	1100	1	13,0	
	15	950	3	20,0	[32]
	0,042	1000	1	2800	[57]
	200	950	5	2,0*	[55]
	100	950	10	2,7*	
	0,042	1000	1	2800*	
	100	1050	10	6,0*	[7]
	10	1050	5	1,0*	
	1,0			10,0*	
Ni/Cr	4,8	1100	3	16,0*	
Si/Ni	200	900	10	1,9	[57]
	2,0	1000	3	400	[21]
Si/Ni мультислои	100	950	10	3,0	[56]
TaSi	15	950	3	40,0	[32]

Примечания: н. д. — нет данных; \* — в сообщении указано, что омический контакт наносился на Si-грань полупроводника

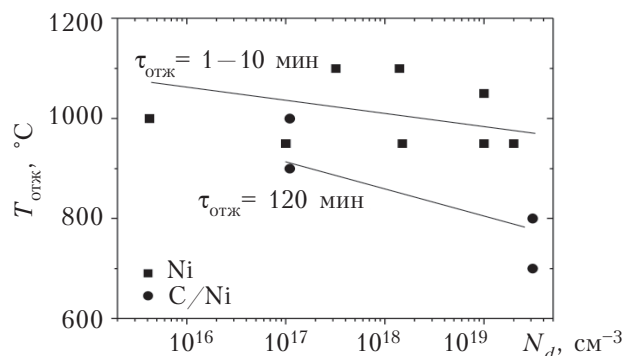


Рис. 5. Параметры отжига контактов на основе никеля к  $n$ -4H SiC при различных концентрациях легирования полупроводника (по данным табл. 5)

ны хорошие омические контакты в широком диапазоне концентраций, однако ни в этом, ни в предыдущем случае пока еще не удалось создать омический контакт с сопротивлением ниже, чем у лучших образцов контактов на основе чистого никеля. Как отмечают И. П. Никитина с соавторами в [55], формирование омического контакта может быть связано не с формированием силицидов никеля или углеродной фазы на границе раздела, а с позитивно заряженными вакансиями углерода в подконтактной области, образованными в процессе межфазных реакций между карбидом кремния и никелем.

С целью повысить термическую стойкость (стойкость к окислению) никелевого контакта предложено использование никелевых сплавов, в частности с хромом [7, 57, 89]. Лучшие результаты по удельному сопротивлению в этих контактах сравнимы с никелевыми. Оптимальный диапазон температуры отжига никелевых омических контактов можно увидеть из рис. 5:  $T_{\text{отж}}$  составляет  $1100 - 950^{\circ}\text{C}$  при  $\tau_{\text{отж}} = 1 - 10$  мин и  $850 - 900^{\circ}\text{C}$  при  $\tau_{\text{отж}} = 120$  мин.

В числе других материалов контактных металлизаций присутствуют и силициды тугоплавких металлов (Ta, Co) и сплав AlTi. Как показано в [89], термическая стабильность контактов на основе AlTi ниже никелевых при сравнимой величине контактного сопротивления.

#### $n$ -6H SiC

Результаты по политутипу 6H во многом схожи с полученными для контактов к 4H SiC. Здесь широко используются контакты на основе никеля и его силицидов, на основе углеродной пленки, карбида тантала (табл. 6). Особенностью же является создание контактов путем наращивания дополнительного слоя карбида кремния [36, 41]. Возможными причинами образования такого контакта называют образование избытка углерода на границе раздела «металл — нанесенный карбид кремния» [36] и образование варизонной структуры при нанесении карбида кремния кубической структуры на гексагональный 6H SiC [41]. Перспективными контактными металлами

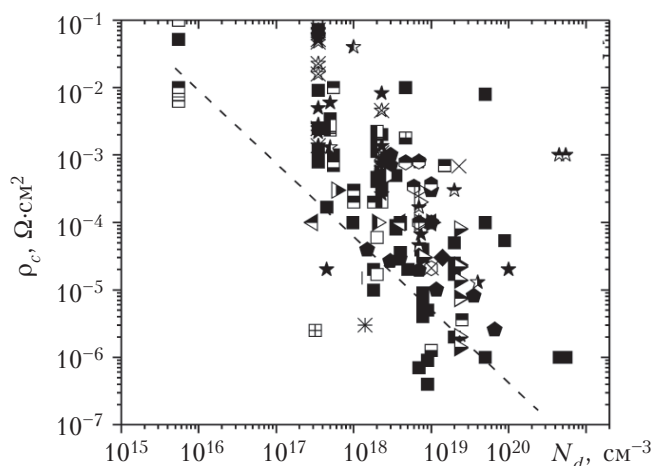


Таблица 6

Характеристики омических контактов хорошего качества к  $n$ -6H SiC

Контакт	$N_d$ , $10^{17} \text{ см}^{-3}$	$T_{\text{отж}}$ , $^{\circ}\text{C}$	$\tau_{\text{отж}}$ , мин	$\rho_c$ , $10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$	Источник
TaC/Au	230	1000	15	1,38	[38]
				1,4	[57]
				2,0	[38]
Nb	14	1100	10	3,0	[57]
Ni	70	950	2	0,7*	[98]
	78	925	2,5	4,0*	
	78	950	2	9,0*	
	200	950	5	6,0*	[103]
	90	950	2	2,0*	
	500	1000	5	0,4**	[98]
	4,5		2	0,9**	
	0,055	1065	10	1,0	[7]
	4,5	1000	0,3	170	[3]
	0,055	1065	10	52000	[72]
	4,5	1000	0,3	170	[64]
	9,8	1050	5	100	[19, 27]
	90	950	2	5,0	[55]
	80		2	5,0	[19, 27, 57]
	79		5	5,0	[62]
3C SiC/Ni	20	1000	0,5	10	[57]
				20	[34]
C/Ni	100	700	120	17*	[41]
Re	12,8	1000	120	1,26*	[84]
SiC/Al/Mo	3,0	1600	50	15*	[97]
Ni <sub>2</sub> Si	0,055	1065	10	100**	[36]
		960		6300	[28]
		1070		8900	[28]
NiCr	3,2	1100	3	8000	[39]
W/Ti/Ni	9,8	1050	5	2,5	[57]
Ti	4,5	н. д.	н. д.	100	[19]
				20	[62]

Примечания: н. д. — нет данных; \* — в сообщении указано, что омический контакт наносился на Si-грань полупроводника; \*\* — контакт наносился на C-грань.



- Ni
- ▣ Ni/C
- ▤ NiCr
- TiW
- ✱ Ti/Sb
- ★ TiC
- ✱ Nb
- ▴ Pt/TaC
- ▮ Re
- ▴ Ta
- W
- ★ TiN
- ▴ TaSi
- ▴ Mo
- ✱ WSi<sub>2</sub>
- ▣ NiSi<sub>x</sub>
- ▴ TaC
- ▣ TiNi
- ★ Ti
- ★ TiAl
- WNi
- ✱ Os
- ▣ SiC/Al/Mo
- ▣ 3C.SiC/Ni
- ✱ W/Ti/Ni
- ★ Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt
- ▴ Ta/Ni/Ta
- ▴ Ta/Pt/Ta
- ◆ CoSi<sub>2</sub>

Рис. 6. Приведенные в [7, 16, 19, 27, 28, 32, 34, 36, 38, 41, 55–57, 61–67, 84, 90–103] удельные сопротивления контактов к  $n$ -6H SiC при различных концентрациях легирования полупроводника

также являются Re, Nb и Ti, образующие контакт, сопротивление которого сопоставимо с лучшими результатами для Ni и NiCr (рис. 6).

Оптимальными параметрами отжига никелевых контактов являются  $T_{\text{отж}} = 950 - 1000^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau_{\text{отж}} = 2 - 10$  мин (рис. 7).

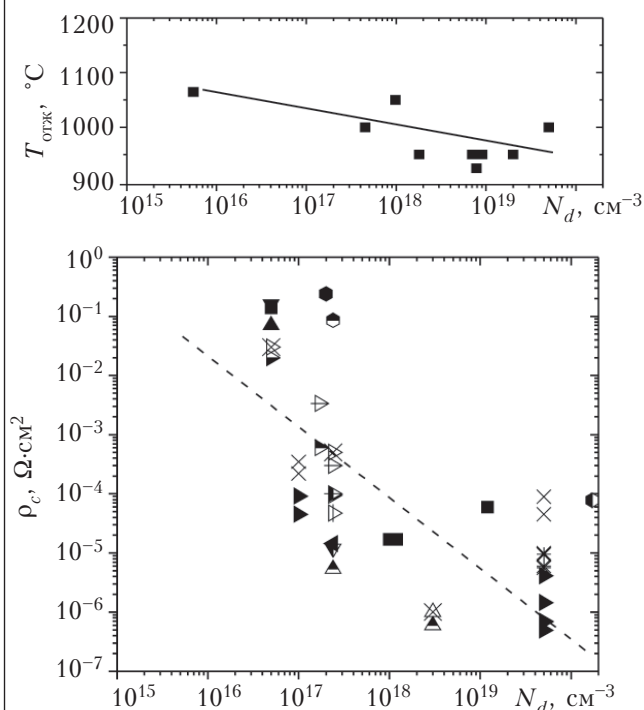
#### $n$ -3C SiC

Политип 3C значительно отличается от рассмотренных выше как по параметрам, так и по наиболее часто используемым материалам для изготовления омических контактов к ним. Как видно из рис. 8, наиболее часто используемым контактным материалом в данном случае является тантал и его соединения [18, 19, 33].

Как показано в табл. 7, омический контакт к  $n$ -3C SiC формируют на основе Al, Cr, Mo, Ni, Re, Ta, Ti. Температура отжига таких контактов (кроме Cr и Ni) не превышает  $500^{\circ}\text{C}$ .

#### $n$ -21R SiC

В [107, 108] приведены результаты исследований зависимости сопротивления омического контакта к 21R SiC от температуры отжига для никелевой контактной металлизации и показано, что оптимальная температура отжига составляет  $1000 - 1100^{\circ}\text{C}$  при длительности 0,17 мин. Результаты, полученные при оптимальных параметрах отжига, приведены в табл. 8.


 Рис. 7. Параметры отжига контактов на основе никеля к  $n$ -6H SiC при различных концентрациях легирования полупроводника (по данным табл. 6)

■ Ni    \* Pt    ▷ TaSiAu    ▷ TaAuAl...Au  
 ● W    ● W/Au    ● TiW    ▷ TaWAl...Au  
 × Re    ▷ TaSi<sub>2</sub>    × TaAu    ▷ TaSi...Au  
 ▷ Ta    ▲ Cr/Au    ▼ Al    ▷ Ti/Ta/Si/Al/Au  
 ▼ Al/Au    ▲ Cr    ◀ Mo/Au    × Cr/Ti/Pt/Mo/Au

 Рис. 8. Приведенные в [7, 18, 19, 33, 62] удельные сопротивления контактов к  $n$ -3C SiC при различных концентрациях легирования полупроводника

Таблица 7

 Характеристики омических контактов хорошего качества к  $n$ -3C SiC

Контакт	$N_d$ , $10^{17} \text{ см}^{-3}$	$T_{\text{отж}}$ , °C	$\tau_{\text{отж}}$ , мин	$\rho_c$ , $10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$	Источник
Ni	10	1000	0,5	17	[19]
	12			17*	[62]
Re	1,0	—	—	350	[18]
		500	30	220	
Ta	500	—	—	0,69	
		500	30	0,50	
	1,0	—	—	45	
		500	30	91	
	500	1000	60	0,70	
	500	1000	60	0,70	[19]
(Ta/W/Au)Au	1,7	400	10	600	[33]
Al/Au	2,4	—	—	11,9	
Cr/Au	2,4	200	10	5,35	
Mo/Au		300		14,4	
Ti/Ta/Si/Al/Au		200		47	
(Ta/Au/Al)/Au		300		94,3	
(Ta/Si)/Au		400		100	
Ta/Au/Si/(Ta/Au)/Ta/Au		400		300	
Cr/Au	30	850	10	0,6	
Cr/Ti/Pt/Mo/Al				1,0	
Cr/Ti/Pt/Mo/Au				1,0	

\* — в сообщении указано, что омический контакт наносился на Si-грань полупроводника

Таблица 8

 Характеристики омических контактов к  $n$ -21R SiC

Контакт	Грань	$N_d$ , $10^{17} \text{ см}^{-3}$	$T_{\text{отж}}$ , °C	$\tau_{\text{отж}}$ , мин	$\rho_c$ , $10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$	Источник
Ni	C	20	1100	0,17	200	[107]
	Si	10				[108]

# Омические контакты к карбиду кремния *p*-типа

## *p*-4H SiC

Для формирования омического контакта к *p*-4H SiC в основном используют AlTi, где Al, как считается, выступает подлегирующим элементом. Среди других металлизаций нужно назвать AlTiNi, TiW, Pd, Ni, Al, Ti (рис. 9).

Оптимальными параметрами отжига контактной металлизации к *p*-4H SiC являются (табл. 9):

для AlTi  $T_{\text{отж}} = 1000 - 1050^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{\text{отж}} = 2 - 5$  мин;

для Ni/Ti/Al  $T_{\text{отж}} = 800^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{\text{отж}} = 2 - 30$  мин;

для NiAl  $T_{\text{отж}} = 1000^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{\text{отж}} = 2$  мин.

Таблица 9

Характеристики омических контактов хорошего качества к *p*-4H SiC

Контакт	$N_a$ , $10^{17}$ см $^{-3}$	$T_{\text{отж}}$ , °C	$\tau_{\text{отж}}$ , мин	$\rho_c$ , $10^{-6}$ Ом·см $^2$	Источ- ник
AlTi	100	1000	2	10,0*	[120]
	130		2	5,0	[57]
			н. д.		[29]
	100		н. д.	49	[22]
	70		2	95	
Al/Ti/ Al	100	1050	5	5,0	[25]
Al/Ti/ Pt/Ni	80	1000	2	90	[30]
	70				[57]
Ni/Ti/ Al	60	800	30	66	[57]
	30		2	70,0	[31]
				100	
300					
TiAlGe	45	400	300	100	[116]
		600			[57]
Ni	300	1000	2	11	[115]
NiAl	60	1000	30	95	[57]
	100		2	7,9	[29]
				28	
				32	
				45	
	н. д.	95			
Pd	0,5	600	н. д.	20000	[119]
Ti	130	800	1	30,0	[57]
Co/Si/ Co	110	800	н. д.	1,5	[29]
TiC	100	500	3	20,0	[37]
TiW	1000	950	30	4,0	[7]
	60			120	
	60	980	3	40,0	[26]

Примечания: н. д. — нет данных; \* — в сообщении указано, что омический контакт наносился на Si-грань полупроводника

## *p*-6H SiC

Контактную металлизацию к *p*-6H SiC, как и к *p*-4H SiC, формируют в основном на основе AlTi с теми же условиями отжига (см. рис. 10, табл. 10). Перспективными также являются контакты на основе AlMo [57], силицидов титана и кобальта [57, 121 — 123].

## *p*-3C SiC

В этом случае лучшие результаты по удельному контактному сопротивлению получают при

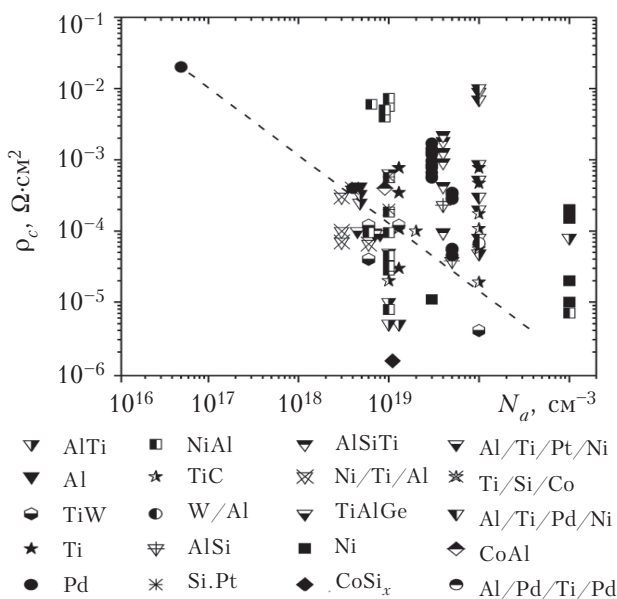


Рис. 9. Приведенные в [7, 22, 25, 26, 29, 30, 31, 37, 40, 57, 71, 89, 96, 109 — 119] удельные сопротивления контактов к *p*-4H SiC при различных концентрациях легирования полупроводника

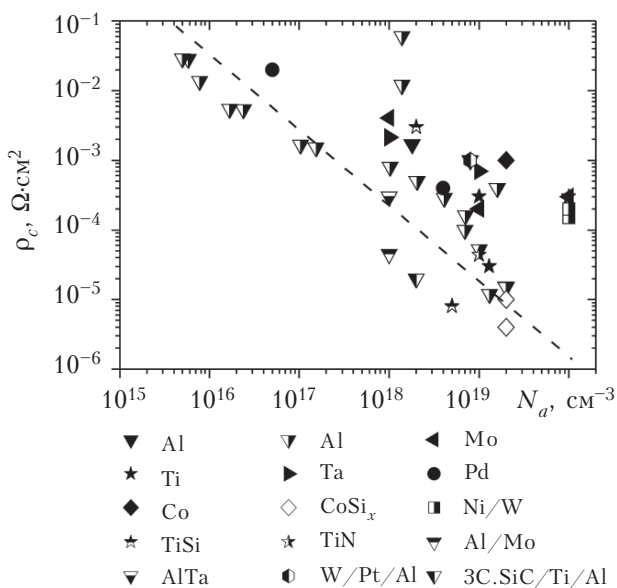


Рис. 10. Приведенные в [19, 40, 41, 57, 62, 63, 119, 121, 124 — 126] удельные сопротивления контактов к *p*-6H SiC при различных концентрациях легирования полупроводника



Таблица 10

Характеристики омических контактов хорошего качества к  $p$ -6H SiC

Контакт	$N_a$ , $10^{17}$ см $^{-3}$	$T_{отж}$ , °C	$\tau_{отж}$ , мин	$\rho_c$ , Ом·см $^2$	Источник
AlTi	130	1000	2	11,9	[40]
	1,5		5	1500	[126]
	1,0			1700	
	0,24			5300	
	0,18			5400	
	0,078			14000	
	0,058			29000	
	0,050			29000	[62]
AlTi/ 3C SiC*	20	950	2	20	[41]
Co/Si	200	900	120	4,0	[57]
TiSi	50	1000	1,5	8,0	[121]
Al/Mo	10	1200	0,67	45	[57]

Примечание: \* — в сообщении указано, что омический контакт наносился на Si-грань полупроводника

использовании контактообразующих слоев с Al в разных комбинациях (табл. 11).

$p$ -15R SiC

В табл. 12 представлены параметры контактов к  $p$ -15R SiC на основе Pd, сформированные при температуре 600°C.

### Закключение

Анализ литературных данных показывает, что формирование омического контакта хорошего качества возможно к слоям карбида кремния не только при больших ( $10^{19}$ – $10^{20}$  см $^{-3}$ ), но и при малых ( $5 \cdot 10^{15}$ – $10^{16}$  см $^{-3}$ ) концентрациях легирования [39], причем с уменьшением концентрации на порядок, на порядок возрастает и величина удельного контактного сопротивления.

В качестве контактной металлизации к  $n$ -4H SiC и  $n$ -6H SiC используют Ni, NiCr, NiSi $_x$ , перспективными контактными металлами также являются Re, Nb и Ti.

К  $n$ -3C SiC наиболее часто используемым контактным материалом является тантал и его соединения. Качественный контакт формируют также на основе Al, Cr, Mo, Ni, Re, Ta, Ti. Температуры отжига таких контактов (кроме Cr и Ni) не превышают 500°C.

Лучшие результаты удельного контактного сопротивления к  $p$ -4H SiC,  $p$ -6H SiC,  $p$ -3C SiC получают при использовании контактообразующих слоев из AlTi и других алюминийсодержащих составов (AlTiNi, TiW), а к перспективным металлизациям здесь относятся Pd, Ni, Ti.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Лебедев А. А., Челноков В. Е. Широкозонные полупроводники для силовой электроники // ФТП. — 1999. —

Таблица 11

Характеристики омических контактов хорошего качества к  $p$ -3C SiC

Контакт	$N_a$ , $10^{17}$ см $^{-3}$	$T_{отж}$ , °C	$\tau_{отж}$ , мин	$\rho_c$ , Ом·см $^2$	Источник
Ni	10	700	15	0,028	[19]
Al	0,1	880	3	0,031	
Au/Ta/Al	0,1	1200	30	0,47	
TaSi $_2$ /Al				0,2	

Таблица 12

Характеристики омических контактов хорошего качества к  $p$ -15R SiC

Контакт	$N_a$ , $10^{17}$ см $^{-3}$	$\rho_c$ , Ом·см $^2$	Источник
Pd	0,5	0,02	[119]
	40	0,0004	

Т. 33, № 9. — С. 1096–1099. [Lebedev A. A., Chelnokov V. E. // FTP. 1999. Vol. 33, N 9. P. 1096]

2. Войтович В., Гордеев А., Думаневич А. Si, GaAs, SiC, GaN — силовая электроника. Сравнение, новые возможности // Силовая электроника. — 2010. — № 5. — С. 4–10. [Voitovich V., Gordeev A., Dumanevich A. // Silovaya elektronika. 2010. N 5. P. 4]

3. Лебедев А., Сбруев С. SiC электроника: прошлое, настоящее, будущее // Электроника: НТБ. — 2006. — № 5. — С. 28–41. [Lebedev A., Sbruev S. // Elektronika: NTB. 2006. N 5. P. 28]

4. Полищук А. Полупроводниковые материалы и приборы для жестких условий эксплуатации // Современная электроника. — 2006. — № 4. — С. 20–24. [Polishchuk A. // Sovremennaya elektronika. 2006. N 4. P. 20]

5. Лучинин В., Таиров Ю. Отечественный полупроводниковый карбид кремния: шаг к паритету // Современная электроника. — 2009. — № 7. — С. 12–15. [Luchinin V., Tairov Yu. // Sovremennaya elektronika. 2009. N 7. P. 12]

6. Neudeck P. G. Silicon Carbide Technology // In book: The VLSI Handbook. Second Ed. // Ed. by Wai-Kai Chen. — CRC Press LLC, 2006. — P. 1–34.

7. Lee Sang-Kwon. Processing and Characterization of Silicon Carbide (6H- and 4H-SiC) Contacts for High Power and High Temperature Device Applications / Ph.D Dissertation. — Stockholm, KTH, Royal Institute of Technology. — 2002.

8. NSM Archive — Physical Properties of Semiconductors [электронный ресурс] <http://www.matprop.ru>

9. Baliga B. J. Fundamentals of Power Semiconductor Devices. — NY.: Springer Science+Business Media, 2008.

10. Агеев О.А., Беляев А.Е., Болтовец Н.С. и др. Карбид кремния: технология, свойства, применение / Под ред. А. Е. Беляева и Р. В. Конаковой. — Харьков: ИСМА, 2010. [Ageev O.A., Belyaev A.E., Boltovets N.S. i dr. Karbid kremniya: tekhnologiya, svoystva, primeneniye / Pod red. A. E. Belyaeva i R. V. Konakovoi. Khar'kov: ISMA, 2010]

11. Cooper J.A. Critical material and processing issues of SiC electronic devices // Materials Science and Engineering. — 1997. — Vol. B44. — P. 387–391.

12. Goesmann F., Schmid-Fetzer R. Metals on 6H-SiC: contact formation from the materials science. Point of view // Materials Science and Engineering. — 1997. — Vol. B46. — P. 357–362

13. Агеев О. А. Физико-технологические основы формирования контактов к карбиду кремния методами импульсной термообработки / Дисс. ... докт. тех. наук. — Таганрог. — 2005. [Ageev O. A. / Diss. ... dokt. tekh. nauk. Taganrog. 2005]

14. Cooper J.A., Jr. Advances in SiC MOS Technology // Phys. Stat. Sol. (a). — 1997. — Vol. 162. — P. 305–320.
15. Rideout V.L. A review of the theory and technology for ohmic contacts to group III–V compound semiconductors // Solid State Electron. — 1975. — Vol. 18. — P. 541.
16. CichoH S., Mach6 P., Barda B., Machovi V., Slepika P. Raman study of Ni and Ni silicide contacts on 4H- and 6H-SiC // Thin Solid Films. — 2012. — Vol. 520. — P. 4378–4388.
17. Hara S. Characterization of the 6H-SiC (0001) surface and the interface with Ti layer with the Schottky limit // Applied Surface Science. — 2000. — Vol. 162–163. — P. 19–24.
18. Chen J.S., Baichli A., Nicolet M.-A et al. Contact resistivity of Re, Pt and Ta films on n-type fl-SiC: preliminary results // Materials Science and Engineering B. — 1995. — Vol. 29. — P. 185–189.
19. Porter L. M., Davis R. F. A critical review of ohmic and rectifying contacts for silicon carbide // Materials Science and Engineering. — 1995. — Vol. B34. — P. 83–105.
20. Kakanakova-Georgieva A., Marinova Ts., Noblanc O. et al. Characterization of ohmic and Schottky contacts on SiC // Thin Solid Films. — 1999. — Vol. 343–344. — P. 637–641.
21. Kuchuk A.V., Guziewicz M., Ratajczak R. et al. Long-term stability of Ni-silicide ohmic contact to n-type 4H-SiC // Microel. Eng. — 2008. — Vol. 85. — P. 2142–2145.
22. Crofton J., Mohny S.E., Williams J.R., Isaacs-Smith T. Finding the optimum Al–Ti alloy composition for use as an ohmic contact to p-type SiC // Solid-State Electronics. — 2002. — Vol. 46, N 1. — P. 109–113.
23. Lu W., Mitchel W. C., Landis G. R. et al. Ohmic contact properties of Ni/C ыlm on 4H-SiC // Solid-State Electronics. — 2003. — Vol. 47. — P. 2001–2010.
24. Chang S., Wang S., Uang K., Liou B. Investigation of Au/Ti/Al ohmic contact to N-type 4H-SiC // Solid-State Electron. — 2005. — Vol. 49. — P. 1937–1941.
25. Jennings M.R., Perez-Tomas A., Davies M. et al. Analysis of Al/Ti, Al/Ni multiple and triple layer contacts to p-type 4H-SiC // Solid-State Electronics. — 2007. — Vol. 51. — P. 797–801.
26. Lee S.-K., Zetterling C.-M., Ostling M. et al. Low resistivity ohmic contacts on 4H-silicon carbide for high power and high temperature device applications // Microel. Eng. — 2002. — Vol. 60. — P. 261–268.
27. La Via F., Roccaforte F., Makhtari A. et al. Structural and electrical characterisation of titanium and nickel silicide contacts on silicon carbide // Microelectronic Engineering. — 2002. — Vol. 60. — P. 269–282.
28. Barda B., Mach6c P., Cichona S., Kudrnova M. Thermal degradation of Ni-based Schottky contacts on 6H-SiC // Applied Surface Science. — 2011. — Vol. 257. — P. 4418–4421.
29. Vanga H., Lazar M., Brosselard P et al. Ni–Al ohmic contact to p-type 4H-SiC // Superlattices and Microstructures. — 2006. — Vol. 40. — P. 626–631.
30. Vassilevski K., Zekentes K., Tsagaraki K. et al. Phase formation at rapid thermal annealing of Al:Ti:Ni ohmic contacts on 4H-SiC // Materials Science and Engineering B. — 2001. — Vol. 80. — P. 370–373.
31. Konishi R., Yasukochi R., Nakatsuka O et al. Development of Ni/Al and Ni/Ti/Al ohmic contact materials for p-type 4H-SiC // Materials Science and Engineering B. — 2003. — Vol. 98. — P. 286–293.
32. Guziewicz M., Piotrowska A., Kaminska E. et al. Ta–Si contacts to n-SiC for high temperatures devices // Materials Sci. Eng. B. — 2006. — Vol. 135. — P. 289–293.
33. Constantinidis G., Kornilios N., Zekentes K. et al. High temperature ohmic contacts to 3C-SiC grown on Si substrates by chemical vapor deposition // Materials Science and Engineering B. — 1997. — Vol. 46. — P. 176–179.
34. Marinova Ts., Kakanakova-Georgieva A., Krastev V. et al. Nickel based ohmic contacts on SiC // Materials Sci. Eng. — 1997. — Vol. B46. — P. 223–226.
35. Yanga S.J., Kima C.K., Noha I.H. et al. Study of Co- and Ni-based ohmic contacts to n-type 4H-SiC // Diamond and Related Materials. — 2004. — Vol. 13. — P. 1149–1153.
36. Андреев А.Н., Бабанин А.И., Кузнецов А.Н. и др. Омические контакты к SiC-6H n-типа проводимости на основе тонких пленок карбида кремния, осажденных методом магнетронного распыления // ПЖТФ. — Т. 20, №18. — С.11–15. [Andreev A.N., Babanin A.I., Kuznetsov A.N. i dr. // PZhTF. Vol. 20, N 18, P.11]
37. Lee S.-K., Danielsson E., Zetterling C.-M et al. The formation and characterization of epitaxial titanium carbide contacts to 4H-SiC // Mat. Res. Soc. Symp. — 2000. — Vol. 622. — P. T6.9.1.
38. Jang T., Porter L.M., Rutsch G., Odekirk B. Tantalum carbide ohmic contacts to n-type silicon carbide // Appl. Phys. Lett. — 1999. — Vol. 75. — P. 3956–3958.
39. CichoH S., Barda B., Mach6 P. Ni and Ni Silicides Ohmic Contacts on n-type 6H-SiC with Medium and Low Doping Level // Radioengineering. — 2011. — Vol. 20, N. 1. — P. 209–213.
40. Nakatsuka O., Taker T., Koide Y. Murakami M. Low Resistance TiAl Ohmic Contacts with Multi-Layered Structure for p-Type 4H-SiC // Materials Transactions. — 2002. — Vol. 43, N 7. — P. 1684–1688.
41. Dmitriev V.A., Irvine K., Spencer M., Kelner G. Low resistivity ( $10^{-5} \text{ W} \cdot \text{cm}^2$ ) ohmic contacts to 6H silicon carbide fabricated using cubic silicon carbide contact layer // Appl. Phys. Lett. — 1994. — Vol. 64. — P. 318–320.
42. Hara S., Teraji T., Okushi H., Kajimura K. Control of Schottky and ohmic interfaces by unpinning Fermi level // Applied Surface Science. — 1997. — Vol. 117/118. — P. 394–399.
43. Zhongchang Wang, Mitsuhiro Saito, Susumu Tsukimoto, Yuichi Ikuhara Terraces at ohmic contact in SiC electronics: Structure and electronic states // J. Appl. Phys. — 2012. — Vol. 111. — P. 113717 (8p).
44. Калинина Е. В. Управление электрофизическими параметрами слоев карбида кремния и создание приборов для эксплуатации в экстремальных условиях // Дисс. ... докт. физ.-мат. наук. — Санкт-Петербург. — 2008. [Kalinina E. V. / Diss. ... dokt. fiz.-mat. nauk. Sankt-Peterburg. 2008]
45. Ayalew T. SiC Semiconductor Devices Technology, Modeling, and Simulation / Diss. Dokt. techn. Wissenschaften. — Wien, 1sterreich. — 2004.
46. Давыдов С.Ю. Роль дефектов в формировании локальных состояний, наведенных атомами, адсорбированными на поверхности полупроводников // ФТП. — 1997. — Т. 31, N10. — С. 1236–1241. [Davydov S.Yu. // FTP. 1997. Vol. 31, N 10. P. 1236]
47. Aubry-Fortuna V., Perrossier J.-L., Mamor M. et all. What is the role of the metal on the Fermi-level position at the interface with IV-IV compounds? // Microelectronic Engineering. — 1997. — Vol. 37/38. — P. 573–579.
48. Bozack M. J. Surface studies on SiC as related to contacts // Phys. stat. sol. (b). — 1997. — Vol. 202. — P. 549–573.
49. Forbeaux I., Themlin J.-M., Charrier A. et al Solid-state graphitization mechanisms of silicon carbide 6H-SiC polar faces // Applied Surface Science. — 2000. — Vol. 162–163. — P. 406–412.
50. Eichfeld C.M., Horsey M.A., Mohny S.E. et al. Ta–Ru–N diffusion barriers for high-temperature contacts to p-type SiC // Thin Solid Films. — 2005. — Vol. 485. — P. 207–211.
51. Кудрик Я.Я. Удельное сопротивление омических контактов в структурах металл–полупроводник // Петербургский журнал электроники. — 2010. — №1. — С.25–40. <http://www.detimes.net/images/stories/Stat/Methods.pdf> [Kudrik Ya.Ya. // Peterburgskii zhurnal elektroniki. 2010. N1. P.25]
52. Kupka R. K., Anderson W. A. Minimal ohmic contact resistance limits to n-type semiconductors // Appl. Phys. — 1991. — Vol. 69, N6. — P. 3623–1–10.
53. Давыдов С.Ю., Лебедев А.А., Посредник О.В., Тайров Ю.М. Контакт металл-карбид кремния: зависимость высоты барьера Шоттки от полигона SiC // ФТП. — 2001. — Т. 35, N 12. — С. 1437–1439. [Davydov S.Yu., Lebedev A.A., Posrednik O.B., Tairov Yu.M. // FTP. 2001. Vol. 35, N 12. P. 1437]
54. Давыдов С.Ю. Лебедев А.А., Тихонов С.К. К расчету высоты барьера Шоттки на начальной стадии формирования контакта <карбид кремния>-<субмонослойная пленка металла> // ФТП. — 1998. — Т. 32, N 1. — С. 68–71. [Davydov S.Yu. Lebedev A.A., Tikhonov S.K. // FTP. 1998. Vol. 32, N 1. P. 68]
55. Nikitina P., Vassilevski K. V., Wright N. G. et al. Formation and role of graphite and nickel silicide in nickel based

- ohmic contacts to n-type silicon carbide // J. Appl. Phys. — 2005. — Vol. 97. — P. 083709-1—083709-7.
56. B. Pecz Contact formation in SiC devices // Applied Surface Science — 2001. — N 18. — P. 287–294.
57. SiC materials and devices / Ed. by M. Shur, S. Rumyantsev, M. Levinstein. — Singapore: Mainland Press, 2006.
58. Barda B., Mach6c P., Cichona S. et al. Origin of ohmic behavior in Ni, Ni<sub>2</sub>Si and Pd contacts on n-type SiC // Applied Surface Science — 2010. — Vol. 257. — P. 414–422.
59. Mach6c P., Barda B. Improvement of Ni/Si/4H-SiC ohmic contacts by VLS grown sub-contact layer // Microel. Eng. — 2010. — Vol. 87. — P. 2499–2503.
60. Maeyama Y., Nishikawa K., Fukuda Y. et al. Ohmic Contact for C-face n-type 4H-SiC with Reduced Graphite Precipitation // Mater. Sci. Forum. — 2006. — Vols. 527–529. — P. 867–870.
61. Kuchuk A. V., Kladko V. P., Golaszewska K. et al. The Formation Mechanism of Ni-Based Ohmic Contacts to 4H-n-SiC // Silicon Carbide and Related Materials. — 2011. — Vols. 717–720. — P. 833–836.
62. Saxena V., Steckl A. J. Building Blocks for SiC Devices: Ohmic Contacts, Schottky Contacts and p-n Junctions. Chapter 3. // In book: Semiconductors and Semimetals, Vol. 52 // Ed. by Y. S. Park. — Academic Press, 1998.
63. Okojie R. S. A Novel Tungsten-Nickel Alloy Ohmic Contact to SiC at 900 °C // IEEE electron device letters. — 2010. — Vol. 31, N 8. — P. 791–793.
64. 31nar K., Coskun C., Gьr E., Aydogan S. Radiation effects on ohmic and Schottky contacts based on 4H and 6H-SiC // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. — 2009. — Vol. 267. — P. 87–90.
65. Cichon S., Mach6c P., Barda B., Sofer Z. Influence of different SiC surface treatments performed prior to Ni ohmic contacts formation // Microel. Eng. — 2011. — Vol. 88. — P. 553–556.
66. Okojie R. S., Lukco D., Chen Y. L., Spry D. J. Reliability assessment of Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt ohmic contacts on SiC after 1000 h at 600°C // J. Appl. Phys. — 2002. — Vol. 91. — P. 6553–6559.
67. Evans L. J., Okojie R. S., Lukco D. Development of an Extreme High Temperature n-type Ohmic Contact to Silicon Carbide // Materials Sci. Forum. — Vols. 717–720. — P. 841–844.
68. Lu W., Mitchel W. C., Landis G. R. et al. Catalytic graphitization and ohmic contact formation on 4H-SiC // J. Appl. Phys. — 2003. — Vol. 93. — P. 5397–5403.
69. Rastegaeva M.G., Syrkin A.L. Electrical characteristics of tungsten-contacts to 6H-SiC at temperatures between 300 and 950 K // Sensors and Actuators A. — 1992. — Vol. 33. — P. 95–96.
70. Jung K., Sutou Y., Koike J. Improved microstructure and ohmic contact of Nb electrode on n-type 4H-SiC // Thin Solid Films. — 2012. — Vol. 520, N 23. — P. 6922–6928.
71. Lee S.-K., Zetterling C.-M., Ostling M. et al. Low resistivity ohmic titanium carbide contacts to n- and p-type 4H-silicon carbide // Solid-State Electronics. — 2000. — Vol. 44. — P. 1179–1186.
72. Guy O.J., Pope G., Blackwood I. et al. Creating room temperature Ohmic contacts to 4H-SiC: studied by specific contact resistance measurements and X-ray photoelectron spectroscopy // Surf. Sci. — 2004. — Vol. 573. — P. 253–263.
73. Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А., Поссе Е.А., Солдатенков Ф.Ю. Механизм протекания тока в омическом контакте к n-4H-SiC // ФТП. — 2010. — Т. 44, № 4. — С. 482–485. [Blank T.V., Gol'dberg Yu.A., Posse E.A., Soldatenkov F.Yu. // FTP. 2010. Vol. 44, N 4. P. 482]
74. Василевский К.В., Zekentes K., Рендакова С.В. и др. Электрические характеристики и структурные свойства омических контактов к эпитаксиальным слоям 4H-SiC с дырочной проводимостью // ФТП. — 1999. — Т. 33, № 11. — С. 1334. [Vasilevskii K.B., Zekentes K., Reidakova C.B. i dr. // FTP. 1999. Vol. 33, N 11. P. 1334]
75. Buchholt K., Ghandi R., Domeij M. et al. Ohmic contact properties of magnetron sputtered Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> on n- and p-type 4H-silicon carbide // Applied physics letters. — 2011. — Vol. 98. — P. 042108 (3 p)
76. Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А. Механизмы протекания тока в омических контактах металл-полупроводник // ФТП. — 2007. — Т. 41, № 11. — С. 1281–1308. [Blank T.V., Gol'dberg Yu.A. // FTP. 2007. Vol. 41, N 11. P. 1281]
77. Мьюрарка Ш. Силициды для СБИС. — Москва: Мир, 1986. [M'yurarka Sh. Silitsidy dlya SBIS. Moskva: Mir, 1986]
78. Meyer B., Gottlieb U., Laborde O. et al Intrinsic properties of NiSi // J. Alloys and Compounds. — 1997. — Vols. 262–263. — P. 235–237.
79. Давыдов С.Ю., Лебедев А.А., Посредник О.В., Тайров Ю.М. Роль вакансий кремния в формировании барьеров Шоттки на контактах Ag и Au с 3С- и 6H-SiC // ФТП. — 2002. — Т. 36, № 6. — С. 690–692. [Davydov S.Yu., Lebedev A.A., Posrednik O.V., Tairov Yu.M. // FTP. 2002. Vol. 36, N 6. P. 690]
80. Tsai C.J., Yu K.H. Stress evolution during isochronal annealing of Ni/Si system // Thin Solid Films. — 1999. — Vol. 350. — P. 91–95.
81. Давыдов С.Ю., Посредник О. В. О влиянии вакансий в подрешетках кремния и углерода на формирование барьера Шоттки на контакте металл-SiC // ФТП. — 2006. — Т. 40, № 3. — С. 304–306. [Davydov S.Yu., Posrednik O. V. // FTP. 2006. Vol. 40, N 3. P.304]
82. Kuchuk A.V., Guzewicz M., Ratajczak R. et al Thermal degradation of Au/Ni<sub>2</sub>Si/n-SiC ohmic contacts under different conditions // Mat. Sci. Eng. — 2009. — Vol. B 165. — P. 38–41.
83. Julies B.A., Knoesen D., Pretorius R., Adams D. A study of the NiSi to NiSi<sub>2</sub> transition in the Ni-Si binary system // Thin Solid Films. — 1999. — Vol. 347. — P. 201–207.
84. Lu W., Michel J. A., Lukehart C. M et al. Ni Graphite Intercalated Compounds in Ohmic Contact Formation on SiC. // Mat. Sci. Forum. — 2006. — Vols. 527–529. — P. 863–866.
85. La Via F., Roccaforte F., Raineri V. et al Schottky-ohmic transition in nickel silicide/SiC-4H system: is it really a solved problem? // Microelectronic Engineering. — 2003. — Vol. 70. — P. 519–523.
86. Александров О. В., Козловский В. В. Моделирование взаимодействия никеля с карбидом кремния при формировании омических контактов // ФТП. — 2009. — Т. 43, № 7. — С. 917–923. [Aleksandrov O. V., Kozlovskii V. V. // FTP. 2009. Vol. 43, N 7. P. 917]
87. Козловский В.В., Иванов П.А., Румянцев Д.С. и др. Стимулирование металлургических реакций на интерфейсе Ni-SiC протонным облучением // ФТП. — 2004. — Т. 38, № 4. — С. 778–783. [Kozlovskii V.V., Ivanov P.A., Rumyantsev D.S. i dr. // FTP. 2004. Vol. 38, N 4. P. 778]
88. Seyller Th., Emtsev K. V., Speck F. et al Schottky barrier between 6H-SiC and graphite: Implications for metal/SiC contact formation // Applied Physics Letters. — 2006. — Vol. 88. — P. 242103-1–3.
89. Adedjei A.V., Ahyi A.C., Williams J.R et al. Composite Ohmic Contacts to SiC // Materials Science Forum. — 2006. — Vols. 527–529. — P. 879–882
90. Rastegaeva M.G., Syrkin A. L. Electrical characteristics of tungsten-contacts to 6H-SiC at temperatures between 300 and 950 K // Sensors and Actuators A. — 1992. — Vol. 33. — P. 95–96.
91. Kriz J., Gottfried K., Kaufmann C., Gessner T. Determination of ohmic contacts to n-type 6H- and polycrystalline 3C-SiC using circular transmission line structures // Diamond and Related Materials. — 1998. — Vol. 7. — P. 77–80.
92. Barda B, Mach6c P, Hubickov6 M. Ti and Ti/Sb ohmic contacts on n-type 6H-SiC // Microelectronic Engineering. — 2008. — Vol. 85. — P. 2022–2024.
93. Mach6c P, Barda B, Kudrnov6 M. Role of titanium in Ti/Ni ohmic contact on n-type 6H-SiC // Microelectronic Engineering. — 2010. — Vol. 87. — P. 274–277.
94. Roccaforte F., LaVia F., Raineri V. et al. Improvement of high temperature stability of nickel contacts on n-type 6H-SiC // Applied Surface Science. — 2001. — Vol. 184. — P. 295–298.
95. Yang H., Peng T. H., Wang W. J et al. Interface metallization and electrical characterization of Ta-Pt multilayers on n-type SiC // Applied Surface Science. — 2008. — Vol. 255. — P. 3121–3125.
96. Kolaklieva L., Kakanakov R., Marinova Ts., Lepoeva G. Effect of metall composition on the electrical and thermal properties of Au/Pd/Ti/Pd contacts to p-type SiC // Materials Science Forum. — 2005. — Vols. 483–485. — P. 749–752.
97. McDaniel G. Y., Fenstermaker S. T., Lampert W. V., Holloway P. H. Rhenium ohmic contacts on 6H-SiC // J. Appl. Phys. — 2004. — Vol. 96. — P. 5357–5364.
98. Crofton J., McMullin P. G., Williams J. R., Bozack M. J. Hightemperature ohmic contact to ntype 6HSiC using nickel // J. Appl. Phys. — 1995. — Vol. 77. — P. 1317–1319.



99. Рыжук Р. В. Разработка и исследование технологических основ формирования диодных ионно-легированных структур на основе карбида кремния / Дисс. ... канд. техн. наук. – Таганрог. – 2010. [Ryzhuk R. V. / Diss. ... kand. tekhn. nauk. Taganrog. 2010]
100. Okojie R. S., Spay D., Krotine J. et al Stable Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt ohmic contacts on n-type 6H-SiC epilayer at 600 °C in air // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. – 2000. – Vol. 622. – P. 1–7.
101. Chaddha A.K., Parsons J.D., Kruaval G.B. Thermally stable, low specific resistance (1,30"10<sup>-5</sup> &"cm<sup>2</sup>) TiC Ohmic contacts to n-type 6H a-SiC // Appl. Phys. Lett. – 1995. – Vol. 66. – P. 760–762.
102. Lundberg N., Ostling M. CoSi<sub>2</sub> ohmic contacts to n-type 6H-SiC // Solid State Electronics. – 1995. – Vol. 38. – P. 2023–2028.
103. Jang T., Rutsch G., Odekirk B., Porter L.M. A comparison of single- and multi- layer ohmic contacts based on tantalum carbide on n-type and Osmium on p-type silicon carbide at elevated temperatures // Material Science Forum. – 2000. – Vol. 338324. – P. 100–1004.
104. Hara S., Teraji T., Okushi H., Kajimura K. Pinning-controlled ohmic contacts: application to SiC(0001) // Applied Surface Science. – 1996. – Vol. 107. – P. 218–221.
105. Rastegaeva M.G., Andreev A.N., Petrov A.A. et al. The influence of temperature treatment on the formation of Ni-based Schottky diodes and ohmic contacts to n-6H SiC // Materials Science and Engineering. – 1997. – Vol. B46. – P. 254–258.
106. Андреев А.Н., Растегаева М.Г., Растегаев В.П., Решанов С.А. К вопросу об учете растекания тока в полупроводнике при определении переходного сопротивления омических контактов // ФТП. – 1998. – Т. 32, № 7. – С. 832–838. [Andreev A.N., Rastegaeva M.G., Rastegaev V.P., Reshanov S.A. // FTP. 1998. Vol. 32, N 7. P. 832]
107. Литвинов В.Л., Демаков К.Д., Агеев О.А. и др. Особенности формирования и характеристики диодов Шоттки Ni/21R-SiC // ФТП. – 2003. – Т. 37, № 4. – С. 473–478. [Litvinov V.L., Demakov K.D., Ageev O.A. i dr. // FTP. 2003. Vol. 37, N 4. P.473]
108. Litvinov V.L., Demakov K.D., Ageev O.A et al. MileninEvolution of structural and electrophysical parameters of Ni/SiC contacts at rapid thermal annealing // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2002. – Vol. 5, N 4. – P. 457–464.
109. Downey B. P., Mohney S. E., Clark T. E., Flemish J. R. Reliability of aluminum-bearing ohmic contacts to SiC under high current density // Microelectronics Reliability. – 2010. – Vol. 50. – P. 1967–1972.
110. Johnson B. J., Capano M. A. The effect of titanium on Al-Ti contacts to p-type 4H-SiC // Solid-State Electronics. – 2003. – Vol. 47. – P. 1437–1441.
111. Kakanakov R, Kassamakova L, Kassamakov I et al. Improved Al:Si ohmic contacts to p-type 4H-SiC // Materials Science and Engineering B. – 2001. – Vol. 80. – P. 374–377.
112. Kassamakova L., Kakanakov R, Nordell N et al. Study of the electrical, thermal and chemical properties of Pd ohmic contacts to p-type 4H-SiC: dependence on annealing conditions // Materials Science and Engineering B. – 1999. – Vol. 61–62. – P. 291–295.
113. Vassilevski K. V., Constantinidis G., Papanicolaou N et al. Study of annealing conditions on the formation of ohmic contacts on p 4H-SiC layers grown by CVD and LPE // Materials Science and Engineering B. – 1999. – Vol. 61–62. – P. 296–300.
114. Wang S. H., Arnold O, Eichfeld C. M et al. Tantalum-Ruthenium Diffusion Barriers for Contacts to SiC // Materials Science Forum. – 2006. – Vols. 527–529. – P. 883–886
115. Crofton J., Williams J.R., Adedeji A.V et al. Ohmic Contacts to P-Type Epitaxial and Implanted 4H-SiC // Materials Science Forum. – 2006. – Vols. 527–529. – P. 895–898.
116. Sakai T., Nitta K., Tsukimoto S et al. Ternary TiAlGe ohmic contacts for p-type 4H-SiC // J. Appl. Phys. – 2004. – Vol. 95. – P. 2187–2189.
117. Kassamakova L., Kakanakov R. D., Kassamakov I. V. et al Temperature Stable Pd Ohmic Contacts to p-Type 4H-SiC Formed at Low Temperatures // IEEE Transactions on electron devices. – 1999. – Vol. 46. – P. 605–611.
118. Papanicolaou N.A., Edwards A., Rao M.V., Anderson W.T. Si / Pt Ohmic contacts to p-type 4H-SiC // Appl. Phys. Lett. – 1998. – Vol. 73. – P. 2009–2011.
119. Kalinina E.V., Kholuyarov G.F., Shchukarev A.V. et al. Pd ohmic contacts to p-SiC 4H, 6H and 15R polytypes // Diamond and Related Materials. – 1999. – Vol. 8. – P. 1114–1117.
120. Mohney S.E., Hull B.A., Lin J.Y., Crofton J. Morphological study of the Al-Ti ohmic contact to p-type SiC // Solid-State Electronics. – 2002. – Vol. 46. – P. 689.
121. Getto R., Freytag J., Kopnarski M., Oechsner H. Characterization of sputtered titanium silicide ohmic contacts on n-type 6H-silicon carbide // Materials Science and Engineering B. – 1999. – Vols. 61–62. – P. 270–274.
122. Nava F., Mazzega E., Michelini M. Analysis of the electrical resistivity of Ti, Mo, Ta, and W monocrystalline disilicides // J. Appl. Phys. – 1989. – Vol. 65. – P. 1584–1590.
123. Loopstra O.B., Sloof W.G., de Keijser Th. H. et al Composition, microstructure, and properties of crystalline molybdenum silicide thin films produced by annealing of amorphous Mo/Si multilayers // J. Appl. Phys. – 1988. – Vol. 63. – P. 4960–4969.
124. Nennewitz O., Spiess L., Breternitz V. Ohmic contacts to p-type 6H-SiC-silicon carbide // Applied Surface Science. – 1995. – Vol. 91. – P. 347–351.
125. Растегаева М. Г. Омические контакты металл-карбид кремния / Дисс. ... канд. техн. наук. – С.-Петербург. – 1999. [Rastegaeva M. G. / Diss. ... kand. tekhn. nauk. S.-Peterburg. 1999]
126. Crofton J., Barnes P.A., Williams J.R., Edmond J.A. Contact resistance measurements on p-type 6H-SiC // Appl. Phys. Lett. – 1993. – Vol. 62. – P. 384–386.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 30.07 2012 г.

Kudryk Ya.Ya., Bigun R. I., Kudryk R. Ya. **Manufacturing technology for contacts to silicon carbide.**

*Key words: ohmic contact, SiC.*

The authors classified the results of investigations of resistivity of ohmic contacts to silicon carbide made without any semiconductor surface modification. A set of contacts with better parameters were analysed. From the results of this analysis, some recommendations were made concerning optimal contact-forming layers for p- and n-SiC types of 4H, 6H, 3C, 15R, 21R polytypes.

Ukraine, Kiev, V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NASU; Ivan Franko National University of Lviv.

Кудрик Я. Я., Бігун Р. І., Кудрик Р. Я. **Технологія виготовлення контактів до карбіду кремнію.**

*Ключові слова: омичний контакт, SiC*

Систематизовано наявні в різних публікаціях результати досліджень питомого опору омичних контактів до карбіду кремнію, виготовлених без будь-якої модифікації поверхні напівпровідника. Проведено аналіз групи контактів з найкращими параметрами, і на основі його результатів зроблені рекомендації щодо оптимальних контактостворюючих шарів для p- та n-типів SiC політипів 4H, 6H, 3C, 15R, 21R.

Україна, м. Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАНУ; Івано-Франківський національний університет імені Івана Франка.



УДК 621.316.825

Д. А. ДИНЕВ<sup>1</sup>, к. т. н. В. Д. ЖОРА<sup>2</sup>, Н. Н. ГРИГОРЬЕВА<sup>2</sup>, В. П. ГРУНЬЯНСКАЯ<sup>2</sup>Болгария, г. Стара Загора, <sup>1</sup>«Милкотроник-ЛТД»;  
Украина, г. Киев, <sup>2</sup>НИИ микроприборов НТК «ИМК» НАНУ

E-mail: vdzhora@ukrpost.net

## ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГИБКИХ ТЕРМОРЕЗИСТОРОВ НА ПОЛИИМИДНОЙ ОСНОВЕ

*Разработана технология изготовления гибких терморезисторов на полиимидной основе и рассмотрены их преимущества в сравнении с другими сенсорами температуры. Такие терморезисторы обеспечивают надежный тепловой контакт с контролируемым объектом сложной формы, кроме того, они малоинерционны, надежны, просты в изготовлении.*

**Ключевые слова:** измерение температуры, терморезисторы, чувствительные элементы, никелевая фольга, полиимидная пленка.

Для измерения температуры наряду с термодатчиками часто применяются как металлические, так и полупроводниковые резистивные сенсоры, имеющие известную зависимость электрического сопротивления от температуры. Наибольшее распространение среди них получили терморезисторы (термометры сопротивления), изменяющие свое сопротивление под влиянием внешней среды. Они состоят из одного или нескольких чувствительных элементов (**ЧЭ**), помещенных, как правило, в герметичный защитный корпус, и имеют внешние клеммы (контактные площадки), предназначенные для подключения к измерительному прибору. Наиболее часто для изготовления ЧЭ металлических терморезисторов применяются платина, медь, никель [1]. Платина имеет более высокий температурный коэффициент сопротивления и высокую стойкость к окислению, однако отличается высокой стоимостью, в силу чего содержащие ее приборы требуют особого учета при эксплуатации и утилизации.

Чувствительные элементы терморезисторов выполняются в виде проволоки или пленочных проводников, получаемых различными методами, например напылением и травлением пленки или фольги. Защитный корпус, в который помещается ЧЭ, чаще всего представляет собой заваренную с одной стороны металлическую трубку длиной от 10 мм до нескольких метров и диаметром от 3 до 12 мм. Очевидно, что массивные корпуса существенно увеличивают инерционность сенсоров температуры и, соответственно, ухудшают точность измерений. Достижение точности измерения температуры требует также хорошего теплового контакта с контролируемым объектом, который не всегда легко обеспечить, особенно в случае объектов сложной формы, например конической или цилиндрической (трубки, сосуды и т. п.). Примером одной из таких задач может

служить контроль и регулирование температуры жидкости или газа, движущихся или находящихся в цилиндрической трубке. Для этой цели наиболее предпочтительными оказываются гибкие терморезисторы, изгибая которые, можно легко добиться надежного контакта всей поверхности сенсора с поверхностью объекта.

Рассмотрим особенности применения металлических терморезисторов. Их преимуществами являются высокая точность измерений (обычно лучше  $\pm 1^\circ\text{C}$ , в ряде случаев может достигать  $0,01^\circ\text{C}$ ); практически линейная характеристика; простота изготовления и применения (нет необходимости в поправках на температуру свободных концов, как у термодатчиков); относительная дешевизна; надежность.

Точность измерения температуры с помощью терморезисторов зависит от ряда факторов [2]:

- терморезистор имеет собственную теплотемкость, которая будет тем меньше, чем меньше его масса, включая массу корпуса;
- терморезистор обменивается теплом как с измеряемым объектом, так и с окружающей средой, а также с измерительным прибором посредством соединительных проводов;
- в процессе измерения температуры наблюдается собственное тепловыделение, которое зависит от величины тока измерения.

На основании анализа эквивалентной термоэлектрической схемы измерения температуры с использованием терморезисторов в [2] показано, что малоинерционность и высокая точность измерения температуры обеспечиваются при наличии хорошего теплового контакта терморезистора с контролируемым объектом и его надежной теплоизоляции от внешней среды. Для уменьшения собственного тепловыделения измерительный ток должен быть достаточно низким.

Вышеперечисленным условиям наиболее полно удовлетворяют гибкие терморезисторы на полиимидной основе (пленке), изготовленные фотолитографическим методом из двухслойного материала «никель — полиимид» [3] с толщиной слоев 7 и 10 мкм соответственно (марки ЭФН-7 по ТУ БУО.023.090).

Целью настоящей работы являлась разработка технологии изготовления гибких терморезисторов на полиимидной основе с номинальным сопротивлением от 100 до 500 Ом как наиболее перспективных для контроля температуры объектов сложной формы.

Технологический процесс изготовления гибких терморезисторов включает в себя следующие операции:

- подготовка поверхности материала;
- нанесение фоторезиста;
- экспонирование;
- проявление;
- травление слоя никеля;
- удаление фоторезиста;
- контроль и измерение сопротивления;
- дотравливание (подгонка до номинала);
- лакирование;
- финишный контроль.

Подготовку поверхности материала проводят в два этапа. Вначале заготовки обрабатывают в горячем ( $70 \pm 5^\circ\text{C}$ ) растворе углекислого натрия и после промывки подтравливают в специально подобранном кислотном растворе для увеличения адгезии фоторезиста. После тщательной промывки заготовки высушивают в сушильном шкафу.

В технологическом процессе используется негативный фоторезист ФН-11С на основе циклокаучука с бисазидом, образующий на гибких подложках эластичный защитный рельеф. Фоторезист наносится методом погружения по ранее разработанной методике [4]. Метод обеспечивает получение оптимальной толщины светочувствительного слоя (порядка 1,5 мкм) в диапазоне рабочих температур при различной вязкости фоторезиста, допускаемой техническими условиями на него. Сушат нанесенный фоторезистивный слой при стандартных режимах.

При экспонировании применяются пленочные фотошаблоны и специальная вакуумная рама, изготовленная с использованием прозрачных пленок с тиснением поверхности, что обусловлено малым шагом (до 90 мкм) и малой шириной (35–45 мкм) вытравливаемых проводников (рис. 1). При откачке воздуха из рамы между двумя пленками с тисненной поверхностью об-

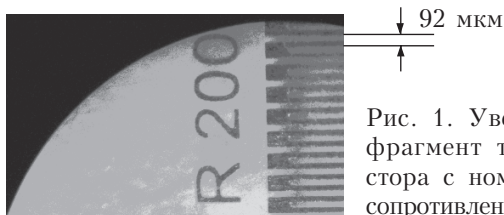


Рис. 1. Увеличенный фрагмент терморезистора с номинальным сопротивлением 200 Ом

разуются каналы, обеспечивающие более полное удаление воздуха и, следовательно, более качественный прижим фотошаблона к гибкой подложке со светочувствительным слоем. Таким образом исключается образование воздушных микропузырьков, которые подобно линзам могут исказить рисунок формируемого в процессе экспонирования защитного рельефа. Глубина вакуума в раме в процессе экспонирования контролируется вакуумметром.

Проявляют защитный рельеф, учитывая малую ширину проводников и зазоров между ними, последовательно в трех порциях уайт-спирита с последующей промывкой в бутилацетате и сушкой в потоке теплого воздуха. Термическое дубление полученного защитного рельефа проводят в два приема при температуре  $100 \pm 10$  и  $150 \pm 10^\circ\text{C}$  с выдержкой по часу при каждой температуре.

Для формирования чувствительного элемента (змейки) с контактными площадками проводится травление слоя никеля в специально разработанном растворе, обеспечивающем оптимальные характеристики процесса (скорость травления, величину неровности края 1–3 мкм, равномерность травления по полю заготовки с сенсорами).

Для удаления фоторезиста заготовки обрабатывают в горячем смывающем составе «Форсан-2» и последовательно промывают в алкилбензолах и бутилацетате.

Визуальный контроль изделий проводят под микроскопом МБС-9 при увеличении  $\times 16$ . При этом помечают бракованные сенсоры. На годных изделиях измеряют сопротивление.

Дотравливание сенсоров до нужных значений номинального сопротивления  $R_{\text{ном}}$  проводят в том же растворе, что и травление никелевого слоя. При этом время повторного травления определяют по экспериментальному графику (рис. 2), в зависимости от значения сопротивления сенсора, измеренного на предыдущей операции. Результаты подгонки сопротивления контролируют сразу после тщательной промывки и сушки сенсора.

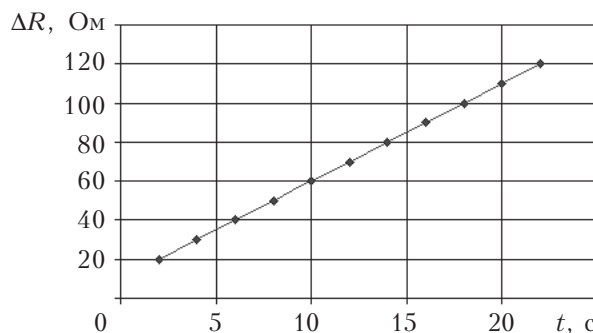


Рис. 2. Увеличение сопротивления  $\Delta R$  в зависимости от времени дотравливания  $t$  при изготовлении сенсоров с  $R_{\text{ном}} = 500$  Ом

Защитный слой лака, предварительно разведенного растворителем до нужной рабочей вязкости, наносят на готовые сенсоры также методом погружения. Сушат лаковый слой в термостате.

Все измерения сопротивления, в том числе и на финишном контроле, проводят с учетом поправок на реальную рабочую температуру в помещении.

Надежный тепловой контакт терморезисторов, изготовленных в соответствии с разработанным техпроцессом, обеспечивается за счет низкого теплового сопротивления тонкой (10 мкм) полиимидной пленки, имеющей в сравнении с другими полимерами достаточно высокую теплопроводность [5] и располагающейся между измеряемым объектом и чувствительным элементом. Низкая теплоемкость терморезисторов на полиимидной основе обусловлена их исключительно малой массой в сравнении с другими сенсорами (терморезистор с номинальным сопротивлением 500 Ом весит около 25 мг).

Номинальные статические характеристики (НСХ) никелевых терморезисторов (зависимость сопротивления 100-омного термометра сопротивления от температуры в интервале  $-60...+180^{\circ}\text{C}$ ), а также формулы для расчета НСХ термометра сопротивления (ТС) и ЧЭ приведены в [1]. Температурная зависимость сопротивления терморезисторов, полученная расчетным путем, близка к линейной (рис. 3).

Терморезисторы с ЧЭ из никелевой фольги имеют температурный коэффициент сопротивления  $\alpha=0,00617^{\circ}\text{C}^{-1}$  [1], определяемый по формуле

$$\alpha=(R_{100}-R_0)/(R_0 \cdot 100^{\circ}\text{C})$$

где  $R_{100}$  и  $R_0$  — значения сопротивления по НСХ при 100 и  $0^{\circ}\text{C}$  соответственно.

Для сенсоров с  $R_{\text{ном}} = 500$  Ом чувствительность составляет чуть более  $3 \text{ Ом}/^{\circ}\text{C}$ , их габаритные размеры, включая змейку и две контактные площадки для припаивания соединительных проводников, составляют  $31,5 \times 11,5$  мм

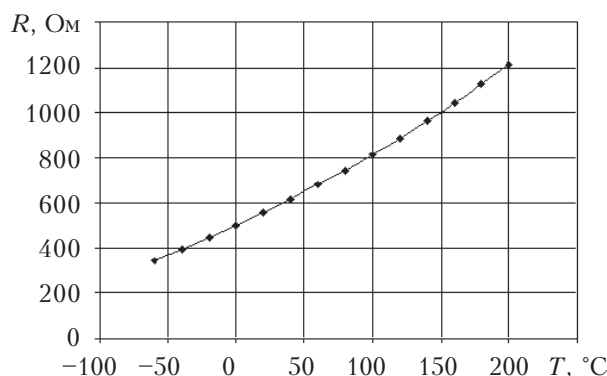


Рис. 3. Зависимость сопротивления сенсоров с  $R_{\text{ном}} = 500$  Ом от температуры  $T$

при ширине вытравленного проводника порядка 35–45 мкм. Чувствительность сенсоров с сопротивлением 200 и 100 Ом чуть больше 1,2 и 0,6 Ом/ $^{\circ}\text{C}$  соответственно. Длина таких сенсоров равна 13,2 мм, а ширина — соответственно, 7 и 5 мм.

\*\*\*

Разработанная технология позволила освоить промышленное изготовление гибких терморезисторов на полиимидной основе и обеспечить их малоинерционность и высокую чувствительность при эксплуатации за счет исключительно малой массы (от 10 до 25 мг) и возможности хорошего теплового контакта с объектами сложной формы (к трубкам). Так, серийно выпускается ряд таких терморезисторов с номинальными сопротивлениями 100, 200 и 500 Ом. Разброс значений сопротивления выпускаемых терморезисторов не более  $\pm 5\%$ . Их преимуществами перед другими сенсорами являются надежность, меньшая стоимость и простота изготовления. На протяжении 5 лет они используются фирмой «Милкотроник-ЛТД» в ультразвуковых анализаторах жирности молока при контроле и стабилизации температуры молока, поступающего в цилиндрические трубки. Опыт использования таких сенсоров в аппаратуре, выпускаемой данной фирмой, показывает, что они удобны при монтаже и достаточно надежны в эксплуатации.

Исключительно малая масса терморезисторов на полиимидной основе делает их перспективными при проведении космических исследований, а также в случаях когда необходимо свести к минимуму влияние самих сенсоров на температуру измеряемой среды или на поглощение ими каких-либо излучений или частиц, например при ядерных исследованиях.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- ГОСТ Р 8.625-2006. Государственная система обеспечения единства измерений. Термометры сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний. [GOST R 8.625-2006. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenii. Termometry soprotivleniya iz platiny, medi i nikelya. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy]
- Войтович И. Д., Корсунский В. М. Интеллектуальні сенсори. — Київ: Інститут кібернетики ім. В.М.Глушкова, 2007. [Voitovich I. D., Korsunskii V. M. Intel'ktual'ni sensori. Kiyiv: Institut kibernetiki im. V.M.Glushkova. 2007]
- Патент 2240921 России. Способ получения полиимидного материала / В. Н. Воробьев, А. В. Воробьев. — 27.11.2004. [Patent 2240921 Rossii. / V. N. Vorob'ev, A. V. Vorob'ev. 27.11.2004]
- Жора В. Д., Шеревеня А. Г., Донцова В. В. и др. Нанесение фоторезистивного слоя в процессе рулонного изготовления гибких носителей для сборки ИС // Электронная техника. Сер. 7. ТОПО. — 1988. — Вып. 3. — С. 5–8. [Zhora V. D., Sherevenya A. G., Dontsova V. V. i dr. // Elektronnaya tekhnika. Ser. 7. TOPO. 1988. Iss. 3. P. 5]
- Плис Н.И., Вербицкий В.Г., Жора В.Д. и др. Технология сборки микросхем на гибком полиимидном носителе // Технология и конструирование в электронной аппаратуре

pe. — 2010. — №. 5–6. — С. 43–45. [Plis N.I., Verbitskii V.G., Zhora V.D. i dr. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2010. N. 5–6. P. 43]

Дата поступления рукописи  
в редакцию 19.06 2012 г.

Dinev D. A., Zhora V. D., Grigoryeva N. N., Grunyanaskaya V. P. **Manufacturing technology for flexible thermoresistors on polyimide base.**

*Keywords: temperature measurement, thermoresistors, sensor elements, nickel foil, polyimide film.*

The article proposes the manufacturing technology for flexible thermoresistors on polyimide film and analyzes their advantages in relation to other temperature sensors. Such heating elements provide good thermal contact with the controlled object of complex shape. In addition, they are quick-response, reliable and easy to manufacture.

Bulgaria, Stara Zagora, "Milcotronic-LTD"; Ukraine, Kiev, SE "RI of Microdevices", STS "Institute for Single crystals" NASU.

Дінев Д. А., Жора В. Д., Григор'єва Н. М., Грунянська В. П. **Технологія виготовлення гнучких терморезисторів на поліімідній основі.**

*Ключові слова: вимірювання температури, терморезистори, чутливі елементи, нікелева фольга, поліімідна плівка.*

Розроблено технологію виготовлення гнучких терморезисторів на поліімідній основі та розглянуто їх переваги в порівнянні з іншими сенсорами температури. Такі терморезистори забезпечують надійний тепловий контакт з контрольованим об'єктом складної форми. Крім того, вони малоінерційні, надійні, прості у виготовленні.

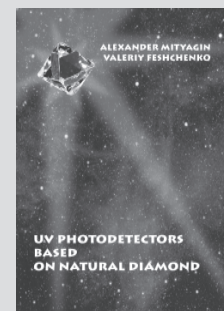
Болгарія, м. Стара Загора, «Мілкотронік-ЛТД»; Україна, м. Київ, ДП «НДІ мікроприладів», НТК «ІМК» НАНУ.

# НОВЫЕ КНИГИ

## НОВЫЕ КНИГИ

Митягин А. Ю., Фещенко В. С. **Фотоприемники УФ-диапазона природных алмазах (на английском языке).**— Одесса: Политехпериодика, 2013.— 128 с.

В монографии представлены результаты исследований фотоприемников на основе природных алмазов, в частности конструкции, технологии изготовления и результаты тестирования экспериментальных моделей одно- и многоэлементных УФ-фотоприемников. Показана принципиальная возможность создания на основе алмаза высокочувствительных элементов матрицы. В книге также представлены разработки двухканальных алмазных фотоприемников, работающих в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах.



Ефименко А. А. **Проектирование межблочных электрических Соединений электронных средств в базовых несущих конструкциях.**— Одесса: Политехпериодика, 2013.— 280 с.

В монографии рассматриваются вопросы проектирования межблочных электрических соединений в электронной аппаратуре, создаваемой с использованием базовых несущих конструкций (БНК). Приводится классификация и характеристика современных типов электрических соединений и БНК, формализованы задачи их проектирования. Большое внимание уделено методам и средствам проектирования межблочных электрических соединений и БНК, а также вопросам создания моделей и алгоритмов проектирования. Отдельно рассмотрены методы проектирования электромонтажа с использованием непаяных контактных соединений.

Монография предназначена для разработчиков электронных средств. Вместе с тем, она может быть полезна студентам и аспирантам соответствующих специальностей.

## НОВЫЕ КНИГИ



УДК 539.1.074

К. х. н. З. Ф. ТОМАШИК<sup>1</sup>, к. х. н. И. Б. СТРАТИЙЧУК, д. х. н. В. Н. ТОМАШИК<sup>1</sup>,  
к. ф.-м. н. С. И. БУДЗУЛЯК<sup>1</sup>, к. х. н. И. И. ГНАТИВ<sup>1</sup>, д. т. н. В. К. КОМАР<sup>2</sup>, Н. Г. ДУБИНА<sup>2</sup>,  
А. П. ЛОЦЬКО<sup>1</sup>, д. ф.-м. н. Д. В. КОРБУТЯК<sup>1</sup>, к. ф.-м. н. Л. А. ДЕМЧИНА<sup>1</sup>, к. ф.-м. н. Н. Д. ВАХНЯК<sup>1</sup>

Украина, г. Киев, <sup>1</sup>Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ;

г. Харьков <sup>2</sup>Институт монокристаллов НАНУ.

E-mail: tomashyk@isp.kiev.ua

## ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ -ДЕТЕКТОРА ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*Разработан способ изготовления рабочего элемента  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ -детектора ионизирующего излучения с высокой чувствительностью к низкоэнергетическому  $\gamma$ -излучению радиоактивного изотопа америция  $^{241}Am$ . Предложенная методика двухэтапной химической обработки поверхности с использованием новых бромвыделяющих полирующих травителей значительно улучшает качество детекторного материала и способствует увеличению его удельной чувствительности к ионизирующему излучению, а также позволяет использовать меньшие по размеру пластины  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ , что приводит к снижению стоимости детекторов.*

**Ключевые слова:** детектор ионизирующего излучения, полупроводник, химическое травление, химико-динамическое полирование, химико-механическое полирование.

В настоящее время разработана технология изготовления полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения на основе высокоомного теллурида кадмия [1].

По сравнению с аналогичными приборами, в которых в качестве активного элемента использованы кремниевые  $p-i-n$ -диоды, устройства, созданные на основе  $CdTe$ - и  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ -детекторов, обладают рядом преимуществ: более низким (до 20 кэВ) пределом диапазона регистрируемых энергий; большей чувствительностью (приблизительно в 3 раза для  $\gamma$ -квантов с энергией 662 кэВ) на единицу объема; большей стабильностью в широком диапазоне температур. Однако их чувствительность недостаточна, например, при необходимости регистрации малых низкоэнергетических потоков  $\gamma$ - или  $X$ -излучения по причине несовершенства поверхности под контактами.

Изготовленные в соответствии с [2] полупроводниковые детекторы  $\gamma$ - и  $X$ -излучения с применением лазерных технологий нанесения контактов характеризуются удовлетворительным качеством, но недостаточно чувствительны к низкоэнергетическому излучению, например к  $\gamma$ -излучению радиоактивного изотопа америция. Для достижения достаточной чувствительности необходимо использовать образцы больших размеров (примерно  $5 \times 10 \times 2$  мм). Это связано с тем, что на поверхности детектора под контактами происходит большая потеря носителей заряда, поскольку используемые травители не дают возможности точно контролировать процесс снятия нарушенного слоя, действуют слишком жестко и недостаточно однородно. Кроме того, стандартные травители, содержащие элементарный бром,

чрезвычайно токсичны, характеризуются значительной летучестью и неустойчивостью. Все вышеуказанное обуславливает высокую стоимость детекторов и приводит к возникновению проблем при создании миниатюрных детекторов и дозиметров на их основе.

Целью настоящей работы является изготовление  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ -детектора ионизирующего излучения, более чувствительного к низкоэнергетическому  $\gamma$ -излучению радиоактивного изотопа америция  $^{241}Am$  при использовании, к тому же, полупроводниковых пластин меньших размеров (а значит, и меньшей стоимости) за счет повышения удельной чувствительности материала.

### Исследуемые образцы

Для изготовления детекторов  $\gamma$ - и  $X$ -излучения использовали высокоомные (с удельным сопротивлением  $\rho \approx 10^9$  Ом·см) монокристаллы  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  (при  $x=0,1$ ), выращенные методом Бриджмена под высоким давлением, с достаточно высоким значением произведения подвижности носителей заряда  $\mu$  на время их жизни  $\tau$ : для электронов  $\mu\tau \approx 5 \cdot 10^{-4}$  см<sup>2</sup>/В, для дырок  $\mu\tau \approx 5 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/В. После разрезания монокристалла на пластины толщиной примерно 2 мм их механически шлифовали водными суспензиями абразивных порошков М-10, М-5 и М-1 в порядке уменьшения зернистости до достижения толщины 1 мм. Процесс шлифования проводили на стеклянном шлифовальнике, поочередно обрабатывая пластины с обеих сторон в течение 3 мин, после чего их тщательно промывали в теплой дистиллированной воде с добавлением небольшого количества поверхностно-активных веществ, затем несколько раз дистиллированной

водой, изопропиловым спиртом и высушивали на воздухе.

При механической обработке монокристаллов  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  образуется нарушенный слой, толщиной несколько десятков микрон. Однако поверхностные свойства материала часто превалируют над объемными и играют доминирующую роль в характеристиках полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения. Поэтому для улучшения электрофизических и спектральных характеристик полупроводниковых приборов в приборостроении особое внимание обращают на состояние поверхности. После всех этапов механической обработки, на конечных этапах обработки пластин полупроводниковых материалов обязательной является их обработка жидкофазным травлением с целью удаления нарушенного слоя и достижения заданной толщины. Во время химического травления происходит постепенное растворение дефектной части (нарушенного слоя), что является типичным примером гетерогенных химических процессов и представляет собой отдельный случай растворения твердых тел в жидкостях [3, 4].

В настоящей работе вместо стандартного жидкофазного полирующего травителя на основе элементарного брома предложено использовать бромвыделяющую смесь азотной, бромистоводородной и винной кислот. Методом химико-динамического полирования (**ХДП**) при помощи разработанного нами универсального жидкофазного бромвыделяющего полирующего травителя  $\text{HNO}_3\text{--HBr--C}_4\text{H}_6\text{O}_6$  [5] со скоростью травления  $v \approx 35$  мкм/мин удаляли образовавшийся в результате механического полирования нарушенный слой толщиной 100–150 мкм. Скорость травления определяли по уменьшению толщины пластин после травления при помощи многооборотного индикатора типа 1МИГП с точностью  $\pm 0,5$  мкм. В отличие от стандартного полирующего травителя, предложенный нами травитель менее токсичен и менее агрессивен, является более эффективным, удобным и безопасным в процессе использования и при этом может хранить длительное время.

Следующим этапом обработки пластин является химико-механическое полирование (**ХМП**), которое обеспечивает достижение достаточно качественной поверхности детектора благодаря управлению скоростью удаления материала при помощи изменения давления на пластину и скорости вращения полировального устройства. При проведении этой операции необходимо учитывать, что ХМП осуществляется при помощи как химического растворения, которое происходит при взаимодействии поверхности кристалла с травильным раствором, так и механического взаимодействия этой же поверхности с полировальником, в результате которого также происходит удаление слоев полупроводника.

В работе использовали стеклянный полировальник, обтянутый синтетической тканью, устойчивой к полирующим суспензиям, механическому износу и сдвигу при полировании и имеющей однородные свойства и одинаковую толщину по всей рабочей зоне полировальника. ХМП пластин проводили в течение 3 мин другим разработанным нами травильным раствором  $\text{H}_2\text{O}_2\text{--HBr--C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2$  при скорости полирования 1 мкм/мин. По окончании процесса ХМП образцы промывали сначала водным раствором  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  с концентрацией 0,1 М, потом большим количеством дистиллированной воды и высушивали в потоке сухого воздуха [6].

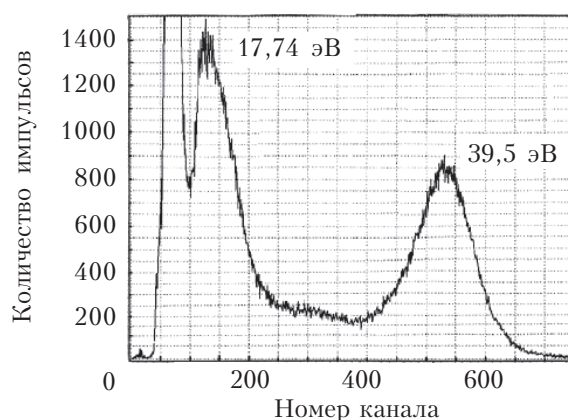
Обработанную пластину  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  разрезали на образцы размерами 5×5 мм. Таким образом, объем детектора на основе полученных образцов (5×5×1 мм) уменьшается примерно в четыре раза по сравнению с обычно используемыми детекторами размером 5×10×2 мм.

Нанесение контактного металла на полученные образцы осуществляли методом лазерного сплавления [2].

#### Измерение спектра $\gamma$ -излучения радиоизотопа $^{241}\text{Am}$

На рисунке представлена спектральная чувствительность изготовленного предложенным способом детектора на основе высокоомного  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  к  $\gamma$ -излучению радиоизотопа  $^{241}\text{Am}$ . Отметим, что без проведения операции ХМП детектор был вообще не чувствителен к излучению этого изотопа. После ХМП на спектре четко проявлялись пики, которые связаны с  $\gamma$ -излучением америкия. При приложении рабочего напряжения в 300 В соотношение сигнал/шум составляло 12:1.

Как показали проведенные исследования, предложенные бромвыделяющие травильные композиции воздействуют на материал чрезвычайно щадяще, однородно и равномерно как во время снятия нарушенного слоя, так и при про-



Спектральная чувствительность детектора на основе высокоомного  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  к  $\gamma$ -излучению радиоизотопа  $^{241}\text{Am}$  (возле пиков указаны значения их энергии)

ведении ХМП для финишного формирования полированной поверхности пластин  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ , оптимальной для нанесения контактов и создания рабочих элементов детектора ионизирующего излучения.

Полученные детекторы применительно к  $\gamma$ -излучению радиоизотопа  $^{241}\text{Am}$  характеризуются энергетическим разрешением (на энергии изотопа 59,5 кэВ) примерно 20% и дискретной чувствительностью около 300 импульс/мкР. (Более подробно результаты исследований характеристик  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ -детекторов будут опубликованы в отдельной работе.)

\*\*\*

Проведенные исследования показали, что благодаря использованию в качестве полирующего травителя бромвыделяющей смеси азотной, бромистоводородной и винной кислот и дополнительно проведению химико-механического полирования полупроводниковой пластины бромвыделяющим травителем на основе смеси пероксида водорода, бромистоводородной кислоты и этиленгликоля стало возможным изготовление  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ -детектора ионизирующего излучения, более чувствительного к низкоэнергетическому  $\gamma$ -излучению радиоактивного изотопа америция  $^{241}\text{Am}$ , чем детектор, описанный в [2]. За счет повышения удельной чувствительности полупроводника были использованы меньшие по толщине полупроводниковые пластины  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ , что привело к уменьшению объема детектора приблизительно в 4 раза и, соответственно, к его удешевлению.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Корбутяк Д. В., Мельничук С. В., Корбут Е. В., Борисюк М. М. Телурид кадмію: домішково-дефектні стани та детекторні властивості. — Київ: «Іван Федоров», 2000. [Korbutyak D. V., Mel'nichuk S. V., Korbut E. V., Borisyuk M. M. Telurid kadmiyu: domishkovo-defektni stani ta detektorni vlastivosti. Kiev: «Ivan Fedorov», 2000]
2. Декл. пат. на винахід 46513А України. Спосіб виготовлення детектора  $\gamma$ - та  $X$ -випромінювання на основі високоомних напівпровідників  $\text{CdTe}$  та  $\text{CdZnTe}$  / Д. В. Корбутяк, Я. В. Бобицький, С. І. Будзуляк та ін. — 2002. — Бюл. № 5. [Dekl. pat. na vinakhid 46513A Ukraini. / D. V. Korbutyak, YA. V. Bobits'kii, S. I. Budzulyak ta in. 2002. Byul. N 5]
3. Сангвал К. Травление кристаллов: Теория, эксперимент, применение. — Москва: Мир, 1990. [Sangval K. Travlennye kristallov: Teoriya, eksperiment, primeneniye. Moscow: Mir, 1990]
4. Никифорова-Денисова С. Н. Механическая и химическая обработка. Серия «Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники», кн. 4. — Москва: «Высшая школа», 1989. [Nikiforova-Denisova S. N. Mekhanicheskaya i khimicheskaya obrabotka. Seriya «Tekhnologiya poluprovodnikovyykh priborov i izdelii mikroelektroniki», kn. 4. Moscow: «Vysshaya shkola», 1989]
5. Томашик З. Ф., Гнатив И. И., Томашик В. Н., Стратийчук И. Б. Химическое растворение монокристаллов  $\text{CdTe}$  и твердых растворов  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  в бромвыделяющих травильных композициях системы  $\text{H}_2\text{O}_2$ – $\text{HBr}$ –этиленгликоль // Журн. неорган. химии. — 2006. — Т. 51, № 8. — С. 1406–1409. [Tomashik Z. F., Gnativ I. I., Tomashik V. N., Stratiichuk I. B. // Zhurn. neorgan. khimii. 2006. Vol. 51, N 8. P. 1406]

6. Tomashik Z.F., Tomashik V.M., Stratiychuk I.B. et al. Chemical-mechanical polishing of  $\text{CdTe}$  and  $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$  single crystals by  $\text{H}_2\text{O}_2$ ( $\text{HNO}_3$ )– $\text{HBr}$ –organic solvent etchant compositions // J. Electron. Mater. — 2009. — Vol. 38, N 8. — P. 1637–1644.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 11.10 2012 г.

Tomashik Z. F., Stratiichuk I. B., Tomashik V. N., Budzulyak S. I., Gnativ I. I., [Komar V. K.], Dubina N. G., Lots'ko A. P., Korbutyak D. V., Demchina L. A., Vakhnyak N. D. **Features of manufacturing  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  ionizing radiation detector.**

**Keywords:** radiation detectors, semiconductor, chemical etching, chemical-dynamic polishing, chemical-mechanical polishing.

The article describes a newly-developed method of manufacturing of an operating element of the  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ -detector of ionizing radiation with high sensitivity to low-energy gamma radiation of the americium  $^{241}\text{Am}$  radioactive isotope. The proposed two-step method of chemical surface treatment with the use of new bromine releasing polishing etchants significantly improves the quality of the detector material and increases its specific sensitivity to ionizing radiation. This allows to use smaller  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  plates, which results in lowering of the cost of detectors.

Ukraine, Kiev, V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of NASU; Kharkov, Institute for Single Crystals of NASU.

Томашик З.Ф., Стратийчук І.Б., Томашик В.М., Будзуляк С.І., Гнатів І.І., [Комар В.К.], Дубина Н.Г., Лоцько А.П., Корбутяк Д.В., Демчин Л.А., Вахняк Н.Д. **Особливості виготовлення  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ -детектора іонізуючого випромінювання.**

**Ключові слова:** детектор іонізуючого випромінювання, напівпровідник, хімічне травлення, хіміко-динамічне полірування, хіміко-механічне полірування.

Розроблено спосіб виготовлення робочого елементу  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ -детектора іонізуючого випромінювання з високою чутливістю до низкоенергетичного  $\gamma$ -випромінювання радіоактивного ізотопу америцію  $^{241}\text{Am}$ . Запропонована методика двоетапної хімічної обробки поверхні з використанням нових бромвиділяючих поліруючих травників значно покращує якість детекторного матеріалу та сприяє збільшенню його питомої чутливості до іонізуючого випромінювання. Це дозволяє використовувати менші за розміром пластини  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ , що призводить до зниження вартості детекторів.

Україна, м. Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ; м. Харків Інститут монокристалів НАНУ.



УДК 621.315.592

А. И. МОСТОВОЙ<sup>1</sup>, В. В. БРУС<sup>1,2</sup>, д. ф.-м. н. П. Д. МАРЬЯНЧУК<sup>1</sup>,  
к. ф.-м. н. К. С. УЛЬЯНИЦКИЙ<sup>1</sup>

Украина, <sup>1</sup>Черновицкий национальный университет им. Юрия Федьковича,

<sup>2</sup>Черновицкое отделение института проблем материаловедения им. И. М. Францевича НАНУ

E-mail: p.maryanchuk@chnu.edu.ua, victorbrus@mail.ru, mostovysya@mail.ru

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АНИЗОТИПНЫХ ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ $n\text{-TiO}_2\text{:Mn}/p\text{-CdTe}$

*Исследованы электрические свойства анизотипных гетеропереходов  $n\text{-TiO}_2\text{:Mn}/p\text{-CdTe}$ , изготовленных методом электронно-лучевого испарения в вакууме пленки  $\text{TiO}_2\text{:Mn}$  на монокристаллические подложки  $\text{CdTe}$ . Установлены доминирующие механизмы токопереноса при прямых и обратных смещениях гетероперехода.*

**Ключевые слова:** гетеропереход, тонкая пленка, легирование,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CdTe}$ .

В настоящее время неуклонно растет интерес к полупроводниковым гетеропереходам благодаря ряду их преимуществ по сравнению с гомопереходами. Гетеропереходы активно используются в электронике, лазерной технике, фотовольтаике [1, 2]. В то же время значительный интерес представляет создание гетеропереходов, в которых в качестве окна использовались бы широкозонные проводящие прозрачные оксиды, к которым относится  $\text{TiO}_2$ . Тонкие пленки диоксида титана благодаря высокому коэффициенту пропускания в видимой области спектра и широкому диапазону значений удельного электрического сопротивления применяются в солнечных элементах в качестве просветляющего покрытия, фронтального проводящего контакта, диэлектрического слоя, материала для формирования гетеропереходов [3, 4]. Легирование пленок  $\text{TiO}_2$  различными металлами, в частности Mn, позволяет изменять ширину запрещенной зоны материала, что актуально для применения в фотоэлектрических приборах [5].

В свою очередь,  $\text{CdTe}$  является перспективным полупроводниковым материалом, который имеет выгодную для практического использования совокупность основных физико-химических параметров (большая ширина запрещенной зоны, высокий коэффициент поглощения, низкий показатель преломления, небольшая концентрация собственных носителей заряда, хорошие механические и тепловые характеристики, высокая стойкость к химическим реагентам и влаге) [3]. Перспективным в настоящее время считается изготовление фотопреобразователей на основе гетеропереходов, где оптическим окном с широкой запрещенной зоной являются оксиды металлов, а поглощающим слоем —  $\text{CdTe}$ .

Целью настоящей работы является исследование электрических свойств анизотипных гетеропереходов  $n\text{-TiO}_2\text{:Mn}/p\text{-CdTe}$ , полученных нанесением тонкой пленки  $\text{TiO}_2\text{:Mn}$  на монокристаллические подложки  $\text{CdTe}$  методом электронно-лучевого испарения в вакууме.

### Методика эксперимента

Для подложек использовали выращенные методом Бриджмена кристаллы  $\text{CdTe}$   $p$ -типа проводимости с удельной электропроводностью  $\sigma = 8,9 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  и концентрацией носителей заряда  $n = 7,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  при температуре 295 К. Найденная из температурной зависимости коэффициента Холла глубина залегания энергетического уровня  $E_V$ , определяющая равновесные электрические свойства базового материала, составляет +0,05 эВ. Учитывая полученное значение энергии ионизации примесных центров и технологические условия выращивания кристаллов  $\text{CdTe}$ , можно допустить, что основными дефектами в них являются однократно заряженные вакансии кадмия [6].

Структуры изготавливали нанесением пленок  $\text{TiO}_2\text{:Mn}$  на свежесколотую поверхность пластин  $\text{CdTe}$  (размером  $5 \times 5 \times 1 \text{ мм}$ ) в универсальной вакуумной установке Leybold-Heraeus L560 электронно-лучевым испарением спрессованных таблеток из смеси порошка  $\text{TiO}_2$  и Mn в соответствующих пропорциях (при содержании Mn 1 моль%). Размеры таблеток ограничивались диаметром медного тигля (9 мм), с которого производилось испарение материала. Прессование таблеток происходило в специально подготовленной и предварительно очищенной пресс-форме на гидравлическом прессе при нагрузке 2000 кг. Такой нагрузки было достаточно для формирования таблетки с необходимой механической



прочностью для проведения последующих технологических операций без использования дополнительного вяжущего вещества, что повысило чистоту эксперимента.

Сформированные таблетки помещали в медный тигель с водяным охлаждением и постепенно прогревали электронным лучом в вакуумной камере, из которой откачивали воздух молекулярным насосом до давления  $6 \cdot 10^{-3}$  Па. Для предотвращения испарения загрязнений с поверхности оборудования на начальном этапе подогрева таблеток заслонка между тиглем и подложками была закрыта.

Мощность электронного луча, скорость напыления и толщину пленки контролировали с помощью контроллера напыления тонких пленок INFICON XTC. Для прогрева таблеток мощность электронного луча поддерживали на уровне 5–8% от максимального значения. При достижении температуры плавления смеси (которая определялась по изменению фазового состояния таблетки) начинался процесс напыления. Мощность электронного луча повышали (в ручном режиме работы контроллера) до уровня 15% и одновременно открывали заслонку. На протяжении процесса напыления давление остаточных газов в вакуумной камере поддерживали на уровне  $5 \cdot 10^{-3}$  Па.

Фронтальный электрический контакт к тонкой пленке  $\text{TiO}_2\text{:Mn}$  формировали методом термического осаждения индия при температуре подложки  $150^\circ\text{C}$ . Для получения омических контактов к  $p\text{-CdTe}$  предварительно обрабатывали поверхность импульсным лазерным излучением, что приводило к получению  $p^+$ -области в результате ее обогащения вакансиями кадмия при облучении. После обработки на поверхность последовательно осаждали слой золота и меди путем восстановления из водного раствора хлорида золота и медного купороса соответственно.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) гетероструктур  $n\text{-TiO}_2\text{:Mn}/p\text{-CdTe}$  измеряли с помощью комплекта SOLARTRON SI 1286, SI 1255.

### Результаты исследований и их обсуждение

Прямые ветви ВАХ исследуемой структуры, измеренные при различных значениях температуры, приведены на **рис. 1**. Для них характерно увеличение наклона прямого участка с повышением температуры  $T$  вследствие снижения потенциального барьера, обусловленного контактной разностью потенциалов.

Путем экстраполяции линейных участков ВАХ до пересечения с осью напряжений были определены значения высоты потенциального барьера гетероперехода  $\phi_k$  при различной температуре (см. вставку на **рис. 1**).

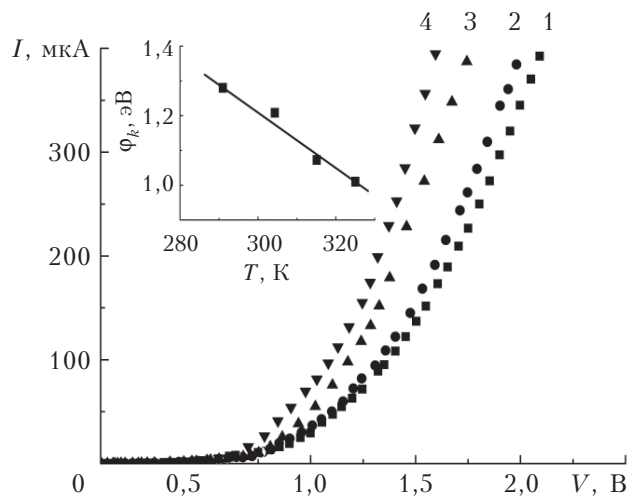


Рис. 1. Прямые ветви ВАХ гетероструктуры  $n\text{-TiO}_2\text{:Mn}/p\text{-CdTe}$  при различных значениях температуры (в К):

1 — 291; 2 — 306; 3 — 315; 4 — 325

На вставке — зависимость высоты потенциального барьера  $\phi_k$  от температуры

Установлено, что температурная зависимость  $\phi_k$  гетероструктуры  $n\text{-TiO}_2\text{:Mn}/p\text{-CdTe}$  хорошо описывается уравнением

$$\phi_k(T) = \phi_k(0) - \beta_\phi T, \quad (1)$$

где  $\beta_\phi$  — температурный коэффициент высоты потенциального барьера,  $\beta_\phi = 8,34 \cdot 10^{-3}$  эВ/К;

$\phi_k(0)$  — значение высоты потенциального барьера исследуемой гетероструктуры при абсолютном нуле температуры,  $\phi_k(0) = 3,72$  эВ.

Большое значение  $\beta_\phi$  по сравнению с температурным коэффициентом ширины запрещенной зоны для  $\text{CdTe}$  ( $\beta_{E_g} = 0,41 \cdot 10^{-3}$  эВ/К) может быть обусловлено значительной концентрацией поверхностных дефектов  $N_s$  на границе раздела « $\text{TiO}_2\text{:Mn} - \text{CdTe}$ », что является следствием существенного различия постоянных решеток компонентов гетероперехода [7].

Прямые ветви ВАХ гетероперехода при различной температуре показаны на **рис. 2**.

Как видно из **рис. 2, а**, при малых смещениях наклона прямолинейных участков (значения  $V$  от  $3kT/e$  до 0,8 В) угол не зависит от температуры, а это исключает возможность проведения анализа токопереноса, основываясь на генерационно-рекомбинационных процессах в области пространственного заряда. Постоянный наклон зависимостей  $\ln I = f(V)$  при различной температуре свидетельствует о туннельной природе механизма токопереноса.

Учитывая высокую концентрацию поверхностных дефектов  $N_s$ , которыми являются дислокации несоответствия, единственным механизмом токопереноса можно считать туннельно-рекомбинационные процессы с участием поверхност-

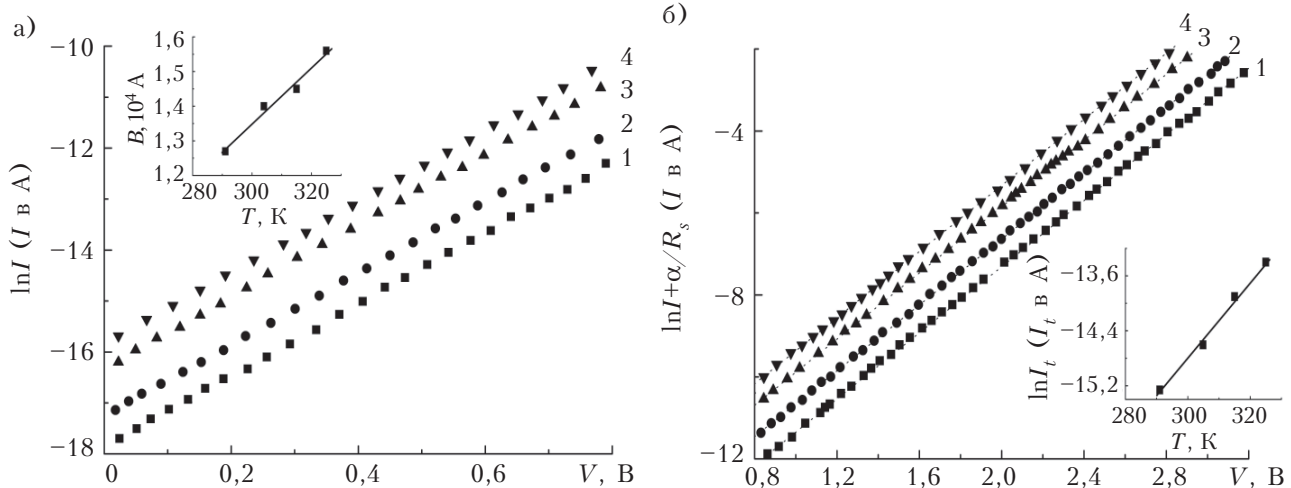


Рис. 2. Прямые ветви ВАХ гетероперехода при  $3kT/e < V < 0,8$  В (а) и при  $V > 0,8$  В (б) при различных значениях температуры (в К):  
1 – 291; 2 – 306; 3 – 315; 4 – 325

На вставках – температурная зависимость коэффициента отсечки (а) и тока отсечки (б)

ных состояний на границе раздела «TiO<sub>2</sub>:Mn – CdTe». Ток при прямом смещении определяется следующим выражением:

$$I = B \exp(-\alpha(\phi_0(T) - eV)), \quad (2)$$

где  $B$  – коэффициент отсечки, который слабо зависит от температуры и напряжения (см. вставку на рис. 2, а);

$\phi_0$  – высота потенциального барьера;  
 $\alpha$  – константа.

Представим выражение (2) в виде

$$I = B \exp[-\alpha\phi_0(T)] \exp(\alpha eV) = I_0 \exp(\alpha eV), \quad (3)$$

где  $I_0 = B \exp(-\alpha\phi_0(T))$  – ток отсечки, который не зависит от приложенного напряжения. Из выражения (3) следует, что коэффициент  $\alpha$  определяется по наклону начальных участков прямых ветвей ВАХ (рис. 2) и принимает значения  $7 \text{ эВ}^{-1}$  при разных температурах.

В области напряжений  $V > 0,8$  В (рис. 2, б) зависимость  $I(V)$  хорошо описывается формулой Ньюмена для туннельного тока [2, 8]:

$$I = I_t^0 \exp(\beta T) \cdot \exp(\gamma V) = I_t \exp(\gamma V), \quad (4)$$

где  $I_t$  – ток отсечки,  $I_t = I_t^0 \exp(\beta T)$ ;  
 $\gamma$ ,  $\beta$  – константы.

Из рис. 2, б видно, что коэффициент  $\gamma$  определяется по наклону начальных участков прямых ветвей ВАХ и принимает значение  $4 \text{ В}^{-1}$ .

Путем экстраполяции температурной зависимости  $\ln I_t = f(T)$ , представленной на вставке рис. 2, б, до пересечения с осью ординат определено  $I_t^0$ , которое составляет  $1,7 \cdot 10^{-5} \text{ А}$ , а по углу наклона линии определен коэффициент  $\beta$ , равный  $5,6 \cdot 10^{-2} \text{ К}^{-1}$ .

При обратном смещении в случае резкого перехода выражение для туннельного тока имеет вид [8]

$$I_{rev}^t \approx a_0 \exp \frac{b_0}{\sqrt{\phi_0(T) - eV}}, \quad (5)$$

где  $a_0$  и  $b_0$  – параметры, которые не зависят от напряжения.

Обратные ветви ВАХ представлены на рис. 3. То, что графики зависимости  $\ln I_{rev}^t = f(\phi_0 - eV)^{-1/2}$  являются прямыми линиями, согласно уравнению (5) подтверждает доминирование туннельного механизма токопереноса в области обратных смещений  $|V| > 3kT/e$ .

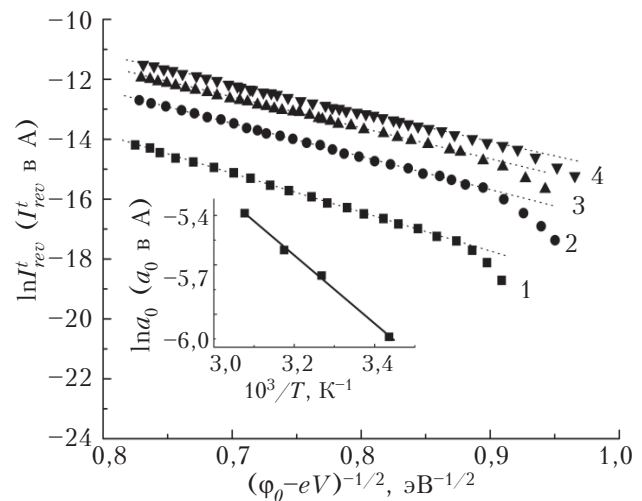


Рис. 3. Обратные ветви ВАХ резкого гетероперехода при обратном смещении при различных значениях температуры (в К):  
1 – 291; 2 – 306; 3 – 315; 4 – 325

На вставке – температурная зависимость параметра  $a_0$

Параметр  $a_0$  определяется вероятностью заполнения энергетического уровня с которого происходит туннелирование при обратном смещении. По наклону графика температурной зависимости  $\ln a_0 = f(10^3/T)$  можно определить глубину его залегания, которая составляет 0,18 эВ.

### Выводы

Исследования электрических свойств анизотипных гетеропереходов  $n\text{-TiO}_2\text{:Mn}/p\text{-CdTe}$ , показали, что доминирующим механизмом токопереноса при малых смещениях ( $3kT/e < V < 0,8$  В) являются туннельно-рекомбинационные процессы с участием поверхностных состояний на границе раздела « $\text{TiO}_2\text{:Mn} - \text{CdTe}$ ». При  $V > 0,8$  В доминирующим механизмом токопереноса является туннелирование, которое описывается формулой Ньюмена. При обратном смещении главным механизмом переноса носителей заряда через гетеропереход является туннелирование через потенциальный барьер с участием энергетического уровня, залегающего на глубине 0,18 эВ.

Информация о свойствах анизотипных гетеропереходов, полученная в данной работе, может быть использована при изготовлении фотопреобразователей на основе гетеропереходов, где оптическим окном с широкой запрещенной зоной являются оксиды металлов, а поглощающим слоем — полупроводниковые материалы на основе соединений  $\text{A}^3\text{B}^5$  и  $\text{A}^2\text{B}^6$ .

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Алферов Ж. И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // ФТП. — 1998. — № 32/1. — С. 3—18. [Alferov Zh. I. // FTR. 1998. N 32/1. P. 3]
2. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент. — Москва: Энергоатомиздат, 1987. [Farenbrukh A., B'yub R. Solnechnye elementy: Teoriya i eksperiment. Moscow: Energoatomizdat, 1987]
3. Брус В. В., Илашчук М. И., Ковалюк З. Д. и др. Механизмы токопереноса в анизотропных гетеропереходах  $n\text{-TiO}_2/p\text{-CdTe}$  // ФТП. — 2011. — № 45/8. — С. 1109—1113. [Brus V. V., Ilashchuk M. I., Kovalyuk Z. D. i dr. // FTR. 2011. N 45/8. P. 1109]
4. Brus V. V., Ilashchuk M. I., Kovalyuk Z. D. et al. Electrical and photoelectrical properties of photosensitive heterojunctions  $n\text{-TiO}_2/p\text{-CdTe}$  // Semicond. Sci. Technol. — 2011. — Vol. 26. — P. 125006—125012.
5. Мостовий А. І., Мар'янчук П. Д., Брус В. В. Оптичні властивості  $\text{TiO}_2\text{:Mn}$  до і після термічної обробки // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2012. — № 56/13. — С. 19—22. [Mostovii A. I., Mar'yanchuk P. D.,

Brus V. V. // Skhidno-Evropeis'kii zhurnal peredovikh tekhnologii. 2012. N 56/13. P. 19]

6. Brus V. V., Ilashchuk M. I., Kovalyuk Z. D., Maryanchuk P. D. Light-dependent I-V characteristics of  $\text{TiO}_2/\text{CdTe}$  heterojunction solar cells // Semicond. Sci. Technol. — 2012. Vol. 27. — P. 055008.

7. Brus V. V. On impedance spectroscopy analysis of nonideal heterojunctions // Semicond. Sci. Technol. — 2012. — Vol. 27. — P. 035024.

8. Шарма Б. Л., Пурохит Р. К. Полупроводниковые гетеропереходы. — Москва: Сов. Радио, 1979. [Sharma B. L., Purokhit R. K. Poluprovodnikovye geteroperekhody. Moscow: Sov. Radio, 1979]

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 19.09 2012 г.*

Mostovyi A. I., Brus V. V., Maryanchuk P. D., Ulyanitskii K. S. **Electrical properties anisotype heterojunctions  $n\text{-TiO}_2\text{:Mn}/p\text{-CdTe}$ .**

*Keywords: heterojunction thin film doping,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CdTe}$ .*

The authors have investigated electronic properties of  $n\text{-TiO}_2\text{:Mn}/p\text{-CdTe}$  anisotype heterojunctions, produced by the method of electron-beam evaporation of  $\text{TiO}_2\text{:Mn}$  film on single-crystal  $\text{CdTe}$  substrates in vacuum. The dominant mechanism of charge transport in the forward and reverse bias has been established.

Ukraine, Chernivtsi National University named after Yuriy Fedkovych, Chernivtsi Branch of the Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NASU.

Мостовий А. І., Брус В. В., Мар'янчук П. Д., Ул'яницький К. С. **Електричні властивості анізотипних гетеропереходів  $n\text{-TiO}_2\text{:Mn}/p\text{-CdTe}$ .**

*Ключові слова: гетероперехід, тонка плівка, легування,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CdTe}$ .*

Досліджено електричні властивості анізотипних гетеропереходів  $n\text{-TiO}_2\text{:Mn}/p\text{-CdTe}$ , виготовлених методом електронно-променевого випаровування у вакуумі плівки  $\text{TiO}_2\text{:Mn}$  на монокристалічних підкладках  $\text{CdTe}$ . Встановлено домінуючі механізми токоперенесення при прямих і зворотних зміщеннях гетеропереходу.

Україна, Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича; Чернівецьке відділення інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАНУ.

# УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2012 г.

## Техническая политика

Применение беспроводных систем мониторинга и связи в энергетике. *Гречихин В. А., Замолотчиков В. Н., Смольский С. М.* (на английском языке)

Мировые тенденции развития микроэлектроники и место Республики Беларусь в этом процессе. *Белоус А. И., Пилипенко В. А., Турцевич А. С., Шведов С. В.*

Система единого генератора. *Басюк О. П.*

## Новые компоненты для электронной аппаратуры

Реальная и предельная чувствительность некоторых приемников излучения ТГц/суб-ТГц-диапазонов. *Шевчик-Шекера А. В.*

Электрические соединители для поверхностного непаяного монтажа. *Ефименко А. А.* (на английском языке)

## Электронные средства: исследования, разработки

Система искусственного интеллекта для технической диагностики фотошаблонов. *Козина Ю. Ю., Козин А. А.*

КИХ-фильтры с независимым управлением фазочастотной характеристикой. *Иванов В. В., Шакурский В. К., Шакурский М. В.*

Импедансный анализатор для идентификации марок водно-спиртовых напитков. *Кукла А. Л., Павлюченко А. С., Майстренко А. С., Мамыкин А. В.*

Полуактивный радиочастотный датчик контроля расхода электроэнергии. *Лищинская Л. Б., Лазарев А. А., Барабан М. В., Филинук Н. А.*

Подавление синхронной помехи в ЯКР с модуляцией Зеемана. *Политанский Л. Ф., Самила А. П., Хандожко В. А.*

Формализованные показатели для оценки качества радиотехнических систем охраны периметров объектов. *Колесник К. В., Кипенский А. В., Мачехин Ю. П., Чурюмов Г. И.*

Многоуровневые платы с толсто пленочной полимерной изоляцией. *Спириг В. Г.*

Светодиодные показывающие электроизмерительные устройства на многопороговых компараторах. *Оборский Г. А., Ковальков В. И., Тищенко В. Н., Слободяник П. Т.*

Тепловая математическая модель полупроводниковых приборов при измерении ВАХ импульс-

ным способом. *Ермоленко Е. А., Бондаренко А. Ф., Баранов А. Н.*

3 Твердотельный импульсный микроволновой мост для спектрометров электронного спинового эха 8-мм диапазона длин волн. *Калабухова Е. Н., Олейник В. В., Савченко Д. В., Ситников А. А., Цвир А. В., Ищенко М. Г.*

## СВЧ-техника

4 Особенности реализации микрополосковых фильтров с кольцевыми резонаторами бегущей волны. *Глушеченко Э. Н.*

6 Пределы управляемости диэлектрической неоднородности, расположенной между металлическими плоскостями. *Прокопенко Ю. В.*

1 Методы формирования алгоритмов для расчета перестраиваемых коаксиальных полосовых фильтров СВЧ. *Парфилов А. А.*

## Системы передачи и обработки сигналов

4 Непрерывная и импульсная синхронизация работы генераторов Чуа. *Элияшив О. М., Галюк С. Д., Политанский Л. Ф., Кушнир Н. Я., Танасюк В. С.*

1 Безындуктивные генераторы хаотических колебаний по схеме Чуа. *Элияшив О. М., Политанский Л. Ф.*

1 Хаотическое маскирование информационных сигналов с использованием генератора на базе системы Лю. *Иванюк П. В., Политанский Л. Ф., Политанский Р. Л., Элияшив О. М.*

1 Синхронизация потоков данных в многоканальных системах ЦОС с перестраиваемой структурой. *Шейк-Сейкин А. Н.*

## Энергетическая электроника

2 Влияние толщины кремниевых пластин на характеристики многопереходных солнечных элементов с вертикальными  $p-n$ -переходами. *Гниленко А. Б., Дзензерский В. А., Плаксин С. В., Погорелая Л. М.*

4 Оптимизация структуры многоячейкового транзисторного преобразователя. *Бондаренко Ю. В., Бондаренко А. Ф., Сафронов П. С., Сидорец В. Н.*

## Биомедицинская электроника

5 Матричный светодиодный излучатель для фотодинамической терапии. *Денисов Н. А., Редчук А. А.*



### Сенсоэлектроника

Компьютерная обработка изображений, полученных при помощи сенсора на базе гетероперехода CdS–Cu<sub>2</sub>S. *Борщак В. А.*

Эффективность сбора зарядов в датчиках g-излучения с различной конфигурацией электродов. *Кондрик А. И.*

Нанокристаллы Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> в роли чувствительных элементов сенсора магнитного поля и температуры. *Дружинин А. А., Островский И. П., Ховерко Ю. Н., Ничкало С. И., Корецкий Р. Н.*

Высокотемпературные датчики давления с тензорезисторами на основе нитевидных кристаллов кремния. *Дружинин А. А., Кутраков А. П., Марьямова И. И.*

### Функциональная микро- и нано-электроника

Определение радиационной стойкости ИС с помощью низкоэнергетического излучения. *Первертайло В. Л.*

Мощные излучающие диоды инфракрасного диапазона. *Коган Л. М.*

Природа переходов и механизмы генерации в лазерах на основе радиационно легированных кристаллов CdS. *Гаркавенко А. С.*

Микрополосковые электромагнитные кристаллы с низкоимпедансными неоднородностями. *Назарько А. И.*

Свойства двойных гетеропереходов p<sup>+</sup>-InP/*n*-InGaAsP/*n*-InP, изготовленных методом жидкофазной эпитаксии. *Вакив Н. М., Круковский С. И., Сукач А. В., Тетёркин В. В., Мрыхин И. А., Михашук Ю. С., Круковский Р. С.*

Температурные поля в растущем кристалле «солнечного кремния». *Кондрик А. И., Даценко О. А., Ковтун Г. П.*

Исследование импульсных характеристик ограничителей напряжения. *Каримов А. В., Ёдгорова Д. М., Рахматов А. З., Скорняков С. Л., Петров Д. А., Абдулхаев О. А.*

Исследование температурной зависимости контактного сопротивления омических контактов к InP. *Новицкий С. В.*

Индуктивность, электрически перестраиваемая полупроводниковой структурой. *Семенов А. А., Усанов Д. А., Колокин А. А.*

Схемотехника СБИС для микроэлектронного координатно-чувствительного детектора для элементного анализа материалов. *Сидоренко В. П., Вербицкий В. Г., Прокофьев Ю. В.*

Повышение надежности диодов Шоттки при воздействии разрядов статического электричества. *Солодуха В. А., Турцевич А. С., Соловьёв Я. А., Рубцевич И. И., Керенцев А. Ф.*

Фотоэлектрические свойства гетеропереходов *n*-SiC/*n*-Si. *Семенов А. В., Козловский А. А., Пузилов В. М.*

3 Фотодиод на основе GaP с повышенной чувствительностью в коротковолновой области УФ-спектра. *Добровольский Ю. Г.*

4 Влияние распределения примеси в базе на фотоэлектрические свойства поверхностно-барьерных УФ-фотоприемников. *Бобренко Ю. Н., Комащенко В. Н., Ярошенко Н. В., Шереметова Г. И., Атдаев Б. С.*

5 Характеристики фотодиодов со структурой «собственный оксид – InSe», облученных высокоэнергетическими электронами. *Сидор О. Н., Сидор О. А., Ковалюк З. Д., Дубинко В. И.*

### Обеспечение тепловых режимов

Интенсивность теплоотдачи при кипении на поверхности малого размера. *Алексеев О. С., Кравец В. Ю., Копчевская И. А.*

1 Пассивная испарительно-конденсационная система охлаждения лазера. *Гершуни А. Н., Нищик А. П.*

1 Экспериментальное исследование энергетических характеристик проницаемого термоэлемента. *Черкез Р. Г., Демьянюк Д. Д.*

### Технологические процессы и оборудование

2 Подключающее МЭМС-устройство для контроля BGA-компонентов. *Невлюдов И. Ш., Мартыняк Р. М., Палагин В. А., Слободян Б. С., Разумов-Фризюк Е. А., Жарикова И. В., Дмитриев М. И., Беляев А. С.*

3 Кинетика процессов осаждения пленок поликремния, легированного кислородом в процессе роста. *Наливайко О. Ю., Турцевич А. С.*

3 Метод оценки качества тонкопленочной платы. *Спирин В. Г.*

3 Технология создания легированных бором слоев на алмазе. *Зяблюк К. Н., Митягин А. Ю., Талипов Н. Х., Чучева Г. В., Духновский М. П., Хмельницкий Р. А.*

4 Исследование качества пайки кристаллов мощных транзисторов релаксационным импеданс-спектрометром. *Турцевич А. С., Рубцевич И. И., Соловьёв Я. А., Васильков О. С., Кононенко В. К., Нисс В. С., Керенцев А. Ф.*

4 Массоперенос при жидкофазной эпитаксии двухслойных систем. *Дранчук С. Н., Завадский В. А., Мокрицкий В. А.*

5 Получение тонких пленок Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> при пониженном давлении на пластинах диаметром до 200 мм. *Наливайко О. Ю., Турцевич А. С.*

### Материалы электроники

Повышение эффективности кремниевых солнечных элементов посредством нанопористого покрытия. *Джафаров Т. Д., Асланов Ш. С., Рагимов Ш. Х., Садыгов М. С., Набиева А. Ф., Айдин Юксел С.* (на английском языке)

2

Фотолюминесцентный метод исследования пластической деформации на границе раздела «SiO<sub>2</sub>—Si». *Кулинич О. А., Яцунский И. Р., Ештокина Т. Ю., Брусенская Г. И., Марчук И. А.*

2

Наноккомпозиты на основе опаловых матриц с кристаллическими ферротороидальными мультиферроиками. *Самойлович М. И., Ринкевич А. Б., Бовтун В., Белянин А. Ф., Нужный Д., Кемпа М., Цветков М. Ю., Клещева С. М.*

3

Влияние толщины и температуры пленок фталоцианина меди на их свойства. *Алиева Х. С.*

3

Механизм формирования межслоевых квантовых нитей в легированном цинком Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>. *Алиева А. П., Алескерова Ф. К., Кахраманов С. Ш., Насибова С. А., Моройдор Е. Д., Пишкин М.*

3

Широкозонные халькогенидные сцинтилляторы на основе соединений A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup>. *Старжинский Н. Г., Гринёв Б. В., Рыжиков В. Д., Малюкин Ю. В., Жуков А. В., Сидлецкий О. Ц., Зеня И. М., Лалаянц А. И.*

4

Прогноз диэлектрических потерь в стеклокерамике для разных соотношений массовых долей компонентов. *Дмитриев М. В., Еримичой И. Н., Панов Л. И.*

4

Гетеропереходы, сформированные отжигом слоистых кристаллов GaSe и InSe в парах цинка. *Кудринский З. Р., Ковалюк З. Д.*

6

Стимулируемая водородом миграция атомов металлов в структурах «металл — полупроводник». *Матюшин В. М., Жавжаров Е. Л.*

6

### Метрология. Стандартизация

Визуальные и оптико-электронные автоколлиматоры. *Фесенко А. В., Боровицкий В. Н.*

6

### Библиография

Указатель статей, опубликованных в журнале в 2011 г.

1

### РЕЦЕНЗЕНТЫ НОМЕРА

*Дмитрук Николай Леонтьевич*, докт. физ.-мат. наук, профессор, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ, г. Киев

*Добровольский Юрий Георгиевич*, канд. техн. наук, начальник научно-аналитического отдела, Научно-производственная фирма «Тензор», г. Черновцы

*Иващук Анатолий Васильевич*, канд. техн. наук, зам. директора научно-учебного центра «Наноэлектроника и нанотехнологии», доцент, НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев

*Кондрик Александр Иванович*, ведущий инженер-исследователь, ННЦ «Харьковский физико-технический институт», г. Харьков

*Круковский Семен Иванович*, докт. техн. наук, начальник сектора, НПП «Карат», г. Львов

*Кудрик Ярослав Ярославович*, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ, г. Киев

*Николаенко Юрий Егорович*, докт. техн. наук, ведущий научный сотрудник, НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев

*Рюхтин Вячеслав Васильевич*, канд. техн. наук, зам. председателя правления по научной работе, ЦКБ «Ритм», г. Черновцы

*Старжинский Николай Григорьевич*, докт. техн. наук, ведущий научный сотрудник Института сцинтилляционных материалов НАНУ, г. Харьков

*Старостенко Владимир Викторович*, докт. физ.-мат. наук, заведующий кафедрой, профессор, Таврический национальный университет им. В. И. Вернадского, г. Симферополь

*Трофимов Владимир Евгеньевич*, канд. тех. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса

## 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 (напр., [2, с. 418]).

7. Список «Использованные источники» формируется в порядке их упоминания в тексте. Желательно избегать ссылок на труднодоступные источники (напр., на материалы конференций) или на недолговечные (напр., Интернет). Принятое в журнале описание источников см. на сайте журнала.

8. Сопроводите рукопись библиографической карточкой на 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 e-mail: [tkea@optima.com.ua](mailto:tkea@optima.com.ua). Если Вы направляете рукопись по почте, приложите запись статьи на CD.

Текст статьи набирается на русском или английском языке 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. 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 dpi.

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).



## МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ

01135, м. Київ, проспект Перемоги, 10, тел. (044) 486 2442, факс (044) 236 1049, [ministry@mon.gov.ua](mailto:ministry@mon.gov.ua)

Від 28.01.13 № 4638  
На № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_

Директорові  
Приватного підприємства  
«Політехперіодика»  
Тихоновій О. А.

а/с 17  
Одеса  
65044

Про науково-технічні журнали

Шановна Олено Анатоліївно!

Розглянувши Ваш лист від 3 січня 2013 року № ПП-05, повідомляємо, що журнали «Техника и приборы СВЧ» і «Технология и конструирование в электронной аппаратуре» включені до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук і на цій підставі статті, опубліковані у згаданих журналах, зараховуються до мінімальної кількості публікацій за темою дисертації для здобувачів наукових ступенів. З урахуванням того, що вказані журнали включені до бази DOAJ, статті, в них опубліковані, прирівнюватимуться до іноземних публікацій за темою дисертації, що передбачено абзацом другим підпункту 2.1 та абзацом другим підпункту 2.2 пункту 2 наказу Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України від 17 жовтня 2012 року № 1112 «Про опублікування результатів дисертацій на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», зареєстрованого в Міністерстві юстиції України 02 листопада 2012 року за № 1851/22163.

З повагою,

Перший заступник Міністра

Є. М. Суліма



### Малогабаритная вакуумная установка магнетронного напыления настольного типа **МВУ ТМ-Магна Т**



#### Назначение:

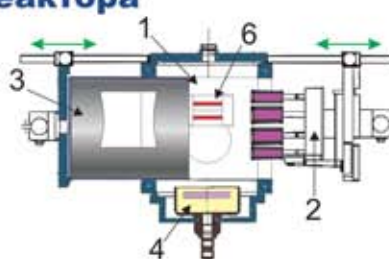
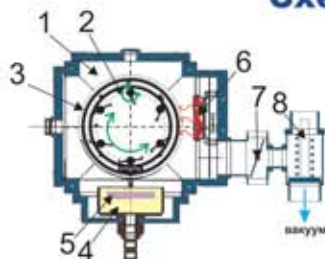
Нанесение плёнок металлов (Cu, Cr, Al, и др.)  
и диэлектриков (SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, др.) методом магнетронного

#### Особенности:

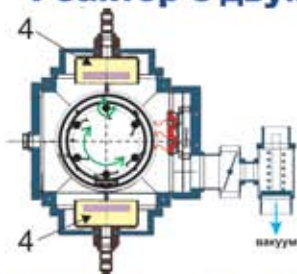
- Групповая обработка пластин:
 

60x48 мм	6шт.	} двухсторонняя обработка.
30x48 мм	12шт.	
Ø 150 мм	2шт.	} односторонняя обработка.
Ø 60, 76, 100 мм	4шт.	
- Откачка реактора до предельного разряжения  $5 \cdot 10^{-4}$  Па;
- Подготовка поверхности подложек – нагрев и ионная очистка.
- Автоматизированное управление от микропроцессора.
- Малогабаритная безмасляная вакуумная система откачки.
- Автономная система водяного охлаждения.
- Потребляемая мощность не более 5,5 кВт.
- Площадь, занимаемая одной установкой ~1,5 м<sup>2</sup>.
- Возможны комбинации нескольких источников на одной рабочей камере

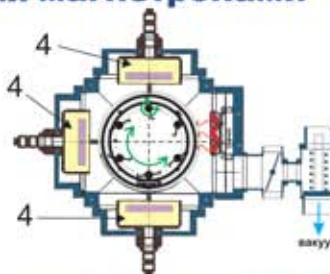
### Схема реактора



### Реактор с двумя и тремя магнетронами



**МВУ ТМ-Магна Т x 2**



**МВУ ТМ-Магна Т x 3**

- 1 Рабочая камера;
- 2 Планетарный подложкодержатель;
- 3 Вращающийся экран - цилиндрическая заслонка;
- 4 Магнетрон;

- 5 Распыляемая мишень;
- 6 Система нагрева и ионной очистки;
- 7 Дроссельная заслонка;
- 8 Клапан.

ОАО "Научно-исследовательский институт тонкого машиностроения" (НИИТМ)  
Россия, 124460 Москва, Зеленоград, Пашковский проспект, 10  
Телефон: +7 (495) 229-75-01 Факс: +7 (495) 229-75-22  
E-mail: info@nibt.ru Сайт: www.nibt.ru

Номер готовили  
Киев, Львов, Одесса, Симферополь,  
Стара Загора, Харьков, Черновцы



Пишите  
Подписывайтесь  
Читайте