

ТРА

ТЕХНОЛОГИЯ И
КОНСТРУИРОВАНИЕ В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ



К статье «Принципиально новый подход
к изготовлению СВЧ-элементов и узлов
систем связи и навигации»

5(59) 2005

СЕНТЯБРЬ – ОКТЯБРЬ

Подписка 2006



| № п/п | Наименование издания | Периодичность | Валовая прибыль издательства | | | |
|-------|--|---------------|------------------------------|-------------|--------|--------|
| | | | 1 кв. | 2 кв. | 3 кв. | 4 кв. |
| 10171 | ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА УПРАВЛЕНИЯ (рос.) | 12 | 25,81 | 106,55 | 213,88 | 427,32 |
| 10172 | ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА УПРАВЛЕНИЯ СОЦИАЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ (укр., рос., англ.) | 4 | — | 22,55 | 45,10 | 90,20 |
| 10173 | ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ (рос.) | 2 | — | — | 58,11 | 116,22 |
| 10174 | ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ВЫКОМАНЬЯ (укр.) | 8 | 2 кв. 8,42 | 4 кв. 16,84 | — | — |
| 10175 | ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ВЫКОМАНЬЯ (рос.) | 8 | — | — | — | — |
| 10176 | ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ВЫКОМАНЬЯ (рос.) | 8 | — | — | — | — |
| 10177 | ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ВЫКОМАНЬЯ (рос.) | 8 | — | — | — | — |
| 10178 | ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ВЫКОМАНЬЯ (рос.) | 8 | — | — | — | — |
| 10179 | ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ВЫКОМАНЬЯ (рос.) | 8 | — | — | — | — |
| 10180 | ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ВЫКОМАНЬЯ (рос.) | 8 | — | — | — | — |
| 10181 | ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ВЫКОМАНЬЯ (рос.) | 8 | — | — | — | — |
| 10182 | ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ВЫКОМАНЬЯ (рос.) | 8 | — | — | — | — |
| 10183 | ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ВЫКОМАНЬЯ (рос.) | 8 | — | — | — | — |
| 10184 | ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ВЫКОМАНЬЯ (рос.) | 8 | — | — | — | — |
| 10185 | ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ВЫКОМАНЬЯ (рос.) | 8 | — | — | — | — |
| 10186 | ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ВЫКОМАНЬЯ (рос.) | 8 | — | — | — | — |
| 10187 | ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ВЫКОМАНЬЯ (рос.) | 8 | — | — | — | — |
| 10188 | ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ВЫКОМАНЬЯ (рос.) | 8 | — | — | — | — |
| 10189 | ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ВЫКОМАНЬЯ (рос.) | 8 | — | — | — | — |
| 10190 | ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ВЫКОМАНЬЯ (рос.) | 8 | — | — | — | — |
| 10191 | ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ВЫКОМАНЬЯ (рос.) | 8 | — | — | — | — |
| 10192 | ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ВЫКОМАНЬЯ (рос.) | 8 | — | — | — | — |
| 10193 | ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ВЫКОМАНЬЯ (рос.) | 8 | — | — | — | — |
| 10194 | ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ВЫКОМАНЬЯ (рос.) | 8 | — | — | — | — |
| 10195 | ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ВЫКОМАНЬЯ (рос.) | 8 | — | — | — | — |
| 10196 | ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ВЫКОМАНЬЯ (рос.) | 8 | — | — | — | — |
| 10197 | ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ВЫКОМАНЬЯ (рос.) | 8 | — | — | — | — |
| 10198 | ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ВЫКОМАНЬЯ (рос.) | 8 | — | — | — | — |
| 10199 | ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ВЫКОМАНЬЯ (рос.) | 8 | — | — | — | — |
| 10200 | ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ВЫКОМАНЬЯ (рос.) | 8 | — | — | — | — |

Подписка 2006

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



Журнал издается при поддержке Министерства промышленной политики Украины, НПП «Сатурн», ЗАО «Укрналит», Компании «Сатурн Дейта Ингершешел» (г. Киев), НПП «Карат» (г. Львов), СКБ «Молния», Политехнического университета (г. Одесса), ЦКБ «Ритм» (г. Черновцы) и других предприятий и организаций

Международная Каталог периодических изданий Российской Федерации, стран СНГ и Балтийского региона. МК-PERIODICA. Индекс 71141.
В Интернете На сайте МК-PERIODICA (www.periodicals.ru). Индекс 71141.
По Украине Отделения связи. «Каталог изданий Украины». Индекс 23785. Подписное агентство «Идея», www.idea.com.ua. Индекс 11146. Тел./факс +38 (062)381-09-32. Подписное агентство «KSS», www.kss.kiev.ua. Индекс 20363. Тел. +38 (044)464-02-20. Подписное агентство «ПрессЦентр». E-mail: info@prescentr.kiev.ua. Тел./факс +38 (044) 536-11-75, 536-11-80.
По России Отделения связи. Каталог «Газетам и журналам». Индекс 71141. Представительство журнала «ТКЭА» в России: 192286 С.-Петербург, п/о 286, п/я 416; «ЭРА». E-mail: era48@mail.ru, тел. +7 (812)595-40-89.
По Белоруссии Отделения связи. Каталог «Издания стран СНГ». Индексы 23785, 237852.
Через редакцию «ТКЭА».

Адрес редакции: Украина, 65005, г. Одесса, ул. Прохоровская, 45. E-mail: tkea@odessa.net, web-сайт: tkea.wallst.ru, тел. +38 (048)728-18-50, 728-11-89, тел./факс 728-49-46.

Редакция: Е. А. Тихонова, А. А. Ефименко, Л. М. Лейдерман, А. Н. Онищенко, М. С. Назарова.
 Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.
 Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корещук.

Подписано к печати 31.10 2005 г. Формат 60x84 1/8. Печать офсетная. Печ. л. 8,0. Уч.-изд. л. 9,9. Тираж 500 экз. Заказ № 36. Издательство «Нептун-Технология» (65005, г. Одесса, ул. Прохоровская, 45). Отпечатано в типографии издательства «ГЭС» (65012, г. Одесса, ул. Канатная, 81/2).

ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ

2005 № 5 (59)

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

Год издания 29-й

Год регистрации 1992

Регистрационный номер
КВ 2092 от 07.06.96 г.

Зарегистрирован в ВАК по разделам
“Физико-математические науки”,
“Технические науки”

Реферируется
в Украинском РЖ “Джерело” (г. Киев)
и в Реферативном журнале ВИНТИ
(г. Москва)

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР
К.т.н. В. М. Чмиль

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

К.т.н. Н. М. Вакив
Д.т.н. В. Н. Годованюк
К.т.н. А. А. Дашковский
Д.т.н. Л. С. Лутченков
Д.т.н. В. П. Малахов
Д.т.н. В. Ф. Мачулин
В. А. Мингалёв
Е. А. Тихонова

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д.т.н. А. А. Ащеулов
Д.ф.-м.н. А. Е. Беляев,
зам. гл. редактора
К.т.н. Э. Н. Глушеченко,
зам. гл. редактора
Д.т.н. В. Т. Дейнега
Д.ф.-м.н. В. А. Дроздов
К.т.н. И. Н. Еримичой,
зам. гл. редактора
К.т.н. А. А. Ефименко,
ответственный секретарь
Д.ф.-м.н. Г. П. Ковтун
Л. М. Лейдерман
К.т.н. И. Л. Михеева
Д.т.н. С. Ю. Лузин
К.т.н. Ю. Е. Николаенко
Д.ф.-м.н. В. В. Новиков
К.т.н. В. В. Рюхтин
Д.ф.-м.н. П. В. Серба
Д.ф.-м.н. О. И. Шпотюк

УЧРЕДИТЕЛИ

Институт физики полупроводников
им. В. Е. Лашкарёва,
Научно-производственное
предприятие «Сатурн»,
Одесский национальный
политехнический университет,
Редакция журнала «ТКЭА»

Техническая политика

Состояние и проблемы развития радиоэлектронной отрасли Украины.
А. В. Демедюк 3

Электронные средства: исследования, разработки

Анализ методов синдромного декодирования кодов Рида–Соломона. И. В. Иванова 7

СВЧ-техника

Принципиально новый подход к изготовлению СВЧ-элементов и узлов систем связи и навигации. А. Г. Яцененко 10

Биомедицинская электроника

Экспрессное измерение мощности ультрафиолетового излучения в спектральных диапазонах УФ-А и УФ-В+С. К. В. Колежук, В. Н. Комащенко, Н. В. Ярошенко, Г. И. Шереметова, А. С. Майстренко 13

Сенсоэлектроника. Датчики

Новое поколение пьезокерамических датчиков физических величин. В. М. Шаранов, М. П. Мусяенко 15

Нейросетевая аппроксимация термометрической характеристики диодного сенсора. Ю. М. Шварц, П. А. Яганов, В. Г. Дзюба 18

Функциональная микро- и наноэлектроника

Исследование кремниевых диффузионных резисторов при протекании импульса тока большой плотности. В. В. Кушниренко, Г. К. Нинидзе, С. П. Павлюк, Л. Д. Коноваленко 23

Определение характеристик двухбарьерных фотодиодных структур с металлополупроводниковыми переходами. Д. М. Ёдгорова, А. В. Каримов 27

Обеспечение тепловых режимов

Аппаратное построение высокопроизводительных вычислительных систем с повышенной эффективностью теплоотвода. Ю. Е. Николаенко 31

Технологические процессы и оборудование

Ударостойкие защитные пленочные покрытия на основе AlN в электронной технике. А. Ф. Белянин, М. И. Самойлович, В. Д. Житковский, А. Л. Каменева 35

Технологические предпосылки создания МОП-структур с малыми проектными нормами. В. В. Баранов 42

Влияние γ -облучения на фотоэлектрические параметры InSe-гетероструктур. З. Д. Ковалюк, В. Н. Катеринчук, О. А. Политанская, О. Н. Сидор 47

Установка для регенерации сорбентов в электромагнитном поле. М. И. Головка, Ю. В. Гончаренко, В. Н. Горобец, С. М. Зотов, Ф. В. Кивва, В. Г. Гутник, А. И. Говорищев 49

Сетевая система контроля технологического процесса выращивания полупроводниковых кристаллов и тонких пленок. Р. В. Рогов, С. В. Мельничук, Г. И. Воробец 52

Материалы электроники

Получение оптических однофазных монокристаллов ниобата лития больших размеров. И. М. Сольский, Д. Ю. Сугак, В. М. Габа 55

Зависимость свойств толстопленочных терморезисторов от состава базовой шпинели. И. В. Гадзаман, О. Я. Мруз, О. И. Шпотюк, И. М. Брунец 62

Библиография

Новые книги 9, 22, 26, 34, 51, 4-я стр. обл.
В портфеле редакции 22, 46

Выставки. Конференции 6, 41, 3-я и 4-я стр. обл.

2005 № 5 (59)

ТЕХНОЛОГІЯ
ТА
КОНСТРУЮВАННЯ
В
ЕЛЕКТРОННІЙ
АПАРАТУРІ
(російською мовою)

ЗМІСТ

Технічна політика

Стан та проблеми розвитку радіоелектронної галузі України.
О. В. Демедюк (3)

Електронні засоби: дослідження, розробки

Аналіз методів синдромного декодування кодів Ріда–Соломона.
І. В. Іванова (7)

НВЧ-техніка

Принципово новий підхід до виготовлення НВЧ-елементів та вузлів систем зв'язку та навігації.
А. Г. Яцуненко (10)

Біомедицинська електроніка

Експресне вимірювання потужності ультрафіолетового випромінювання в спектральних діапазонах УФ-А та УФ-В+С.
К. В. Колежук, В. М. Комащенко, М. В. Ярошенко, Г. І. Шереметова, А. С. Майстренко (13)

Сенсоелектроніка. Датчики

Нове покоління п'єзокерамічних датчиків фізичних величин.
В. М. Шарпов, М. П. Мусієнко (15)

Нейросітєва апроксимація термометричної характеристики діодного сенсору.
Ю. М. Шварц, П. О. Яганов, В. Г. Дзюба (18)

Функціональна мікро- та наноелектроніка

Дослідження кремнієвих дифузійних резисторів при протіканні імпульсного струму великої щільності.
В. В. Кушніренко, Г. К. Нінідзе, С. П. Павлюк, Л. Д. Коноваленко (23)

Визначення характеристик двобар'єрних фотодіодних структур з металнапівпровідниковими переходами.
Д. М. Йодгорова, А. В. Карімов (27)

Забезпечення теплових режимів

Апаратна побудова високопродуктивних обчислювальних систем з підвищеною ефективністю тепловідведення.
Ю. Є. Ніколаєнко (31)

Технологічні процеси та обладнання

Ударостійкі захисні плівкові покриття на основі AlN в електронній техніці.
А. Ф. Беянін, М. І. Самойлович, В. Д. Житковський, А. Л. Каменєва (35)

Технологічні передумови створення МОН-структур з малими проектними нормами.
В. В. Баранов (42)

Вплив γ -опромінення на фотоелектричні параметри InSe-гетероструктур.
З. Д. Ковалюк, В. М. Катеринчук, О. А. Політанська, О. М. Сидор (47)

Установка для регенерації сорбентів в електромагнітному полі.
М. І. Головка, Ю. В. Гончаренко, В. М. Горобець, С. М. Зотов, Ф. В. Ківа, В. Г. Гутнік, О. І. Говорищев (49)

Мережева система контролю технологічного процесу вирощування напівпровідникових кристалів і тонких плівок.
Р. В. Rogov, С. В. Мельничук, Г. І. Воробець (52)

Матеріали електроніки

Одержання оптично однорідних монокристалів ніобата літію великих розмірів.
І. М. Сольський, Д. Ю. Сугак, В. М. Габа (55)

Залежність властивостей товстопліткових терморезисторів від складу базової шпінелі.
І. В. Гадзаман, О. Я. Мруз, О. І. Шпотюк, І. М. Брунець (62)

CONTENT

Technical polytic

Status and problems of development of radioelectronics branch of Ukraine.
Demediuk A. V. (3)

Electronic means: investigations, development

The analysis of methods of syndromic decoding of codes of Read–Solomon.
Ivanova I. V. (7)

Microwave engineering

Radically new approach to manufacturing microwave components units for communication and navigation systems.
Yatsuneneko A. G. (10)

Biomedical electronics

Quick measurement of ultraviolet radiation power in the UV-A and UV-B+C spectral ranges.
Kolezhuk K. V., Komashchenko V. N., Yaroshenko N. V., Sheremetova G. I., Maystrenko A. S. (13)

The sensoelectronics. Sensors

New generation of piezoceramic sensors of physical values.
Sharapov V. M., Musiyenko M. P. (15)

Neuronet approximation thermometrical characteristics of the diode temperatures sensor.
Shwarts Yu. M., Yaganov P. A., Dzuba V. G. (18)

The functional micro- and nanoelectronics

Investigation of silicon diffusion resistors at course of a pulse of a high current.
Kushnirenko V. V., Ninidze G. K., Pavljuk S. P., Konovalenko L. D. (23)

Definition of characteristic of two-barrier photodiode structures with metal-semiconduction transition.
Yodgorova D. M., Karimov A. V. (27)

Ensuring of thermal modes

Hardware build-up of high-performance computing systems with heightened efficiency of tap of heat.
Nikolayenko Yu. E. (31)

Technological processes and development

Strengthening thin film based on AlN in electronics.
Belyanin A. F., Samoylovich M. I., Jitkovsky V. D., Kameneva A. L. (35)

Technological prerequisites for manufacturing the MOS structures with layout of small dimensions.
Baranov V. V. (42)

Influence of γ -radiation on electrical parameters InSe-heterostructures.
Kovalyuk Z. D., Katerinchuk V. N., Politanskaya O. A., Sidor O. N. (47)

Equipment for sorbent regeneration in the electromagnetic field.
Golovko M. I., Goncharenko Y. V., Gorobets V. N., Zotov S. M., Kivva F. V., Gutnik V. G., Govorishchev A. Y. (49)

Network system for control of the technological process of the growth of semiconducting crystals and thin films.
Rogov R. V., Melnychuk S. V., Vorobets G. I. (52)

Materials of electronics

The obtaining of optical homogenous and large size lithium niobate single crystals.
Solskii I. M., Sugak D. Yu., Gaba V. M. (55)

Effect of basic spinel composition on properties of thick film NTC thermistors.
Hadzaman I. V., Mrooz O. Ya., Shpotyuk O. I., Brunets I. M. (62)

А. В. ДЕМЕДИУК

Украина, г. Киев, Министерство промышленной политики
E-mail: knv@fm.com.ua

Дата поступления в редакцию
27.09.2005 г.

СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ОТРАСЛИ УКРАИНЫ

Проведен анализ и перечислены проблемы, решение которых будет способствовать созданию промышленной, бытовой и специальной техники, которая отвечала бы мировому уровню.

Основой благосостояния Украины является эффективная национальная экономика, которая сегодня и в ближайшей перспективе будет базироваться на наукоемких производствах. Такая промышленная политика присуща всем промышленно развитым государствам мира. Высокая концентрация наукоемких отраслей экономики с высококвалифицированными научными и производственными кадрами исторически сложилась и в Украине, которая, в отличие от стран Запада, имеет еще и значительные промышленные мощности, а также условия для производства необходимого сырья.

По подсчетам экспертов стран ЕС, две трети трудоспособного населения Европы прямо или косвенно заняты в электронике. Она дает на каждый вложенный доллар США 20 долларов прибыли и в три раза больше рабочих мест, чем в металлургии или горнодобывающих отраслях. До 1990 года более 40% трудоспособного городского населения Украины работало в электронной промышленности, электронном приборо- и машиностроении. Микроэлектроника, как наиболее сложная отрасль электроники, определяет уровень развития и конкурентоспособность машиностроения во всех без исключения его направлениях. Изделия микроэлектроники, так называемые чипы, называют „самым ходовым товаром (после сырой нефти), все решающим сырьем”.

Украина имеет мощный машиностроительный потенциал. Отрасли электронного приборо- и машиностроения в свое время создавались для обеспечения их продукцией собственных потребностей Украины и бывшего СССР. До 1991 г. в Украине только в производстве микроэлектроники действовало пять производственных объединений численностью 10—12 тыс. работающих каждое. Большое количество предприятий по производству радиопромышленной продукции, средств связи, электротехники и СВЧ-техники имели собственные производства микроэлектронных изделий. В 1990 г. в Украине электронная отрасль и (на ее основе) электронное приборостроение выпускали 15% товарной продукции в общем

объеме промышленности Украины. Жесткая производственная специализация требовала ориентировать две трети мощностей электронной промышленности и электронного приборостроения на изготовление продукции для бывших союзных республик и, прежде всего, для потребностей военно-промышленного комплекса.

В силу стремительных конверсионных процессов в 1991—1994 гг., создания альтернативных производств в ряде стран СНГ и, в первую очередь, в России, а также вследствие уменьшения спроса на традиционных рынках, объемы производства уменьшились почти в 10 раз. По разным причинам, в том числе и по причине несовершенства процедуры приватизации, производственная деятельность по специализации большинства бывших объединений и предприятий, отраслевых научных организаций практически не осуществлялась. Возникла насущная необходимость в разработке и осуществлении взвешенной государственной промышленной политики, которая разрешила бы предприятиям Украины адаптироваться к рыночным условиям хозяйствования и восстановить рынки сбыта продукции. В 1993 году Кабинет Министров Украины утвердил приоритеты развития промышленности, в том числе радиоэлектроники и приборостроения. Основными элементами этой политики стали структурная перестройка отраслей, организация производства новых видов промышленной продукции и потребительских товаров, необходимых для удовлетворения потребностей государства и внешнего рынка.

На предприятиях электронной отрасли и электронного машиностроения проведены работы по реконструкции производственных мощностей и локальных энергетических сетей с целью уменьшения энергопотребления, снижения себестоимости, повышения рентабельности продукции для дальнейшего развития информационных технологий, систем передачи информации, связи, приборостроения, создания новых видов специальной техники. Как следствие, с 1998 г. удалось стабилизировать ситуацию и начать постепенное восстановление и наращивание объемов производства наукоемкой отечественной радиоэлектронной и приборостроительной продукции. Сегодня отрасли радио- и электронной промышленности, средств связи и общепромышленного приборостроения включают в себя 242 предприятия различных форм собственности, общая численность работающих составляет

95 тыс. чел. За январь—август 2005 г. темпы роста производства предприятий этих отраслей к соответствующему периоду 2004 г. составили 105,5 %.

На сегодня лишь ГП НИИ „Орион” и ОАО „Квазар” (г. Киев) можно рассматривать как действующие специализированные предприятия СВЧ и микроэлектроники. Стабильно работают в разных направлениях радиоэлектронной области также ЦКБМ „Донец” (г. Луганск), НИИ микроприборов, НПП „Сатурн” (г. Киев), Компания „Днепр” (г. Херсон). При решении ряда вопросов смогут эффективно работать НИИ „Гелий” (г. Винница), ОКБ „Рута” и ОАО „Гравитон” (г. Черновцы), ОАО „Родон” (г. Ивано-Франковск) и другие. Основными потребителями отечественных интегральных схем в Украине стали НПО „Коммунар” (г. Харьков), ЦКБ „Луч”, НИИ „Украналитприбор”, ГП „Арсенал”, завод „Радар” (г. Киев), ОАО „Кварц” (г. Черновцы), а также предприятия Российской Федерации, Беларуси и дальнего зарубежья.

НИИ и КБ со времен своего создания финансировались за счет государственного бюджета. На сегодня финансирование научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ из государственного бюджета практически не осуществляется. Так, по одной из бюджетных программ в 2005 г. при потребности в 130,9 млн. грн. выделено всего 2,0 млн. грн.

Вместе с тем созданы и внедрены в производство отечественные системы электронных автоматических цифровых телефонных станций С-32 и универсальная платформа телекоммуникационной системы „Днепр, ЦАТС ЕС-11”, системы мобильной радиосвязи с маскировкой речи „Орион” и „Кордон”, ряд профессиональных антенн спутниковой связи, телевидения и радиовещания с диаметром зеркала от 1,8 до 12 м.

Украина — одна из пяти стран мира, которая усилиями ЦКБМ „Донец” (г. Луганск) занимает ведущее место по разработке и освоению в производстве высокопроизводительного оборудования для выращивания и обработки функциональных крупногабаритных монокристаллических материалов (кремний, сапфир и др.) для наукоемких отраслей экономики.

Разработан ряд новых современных видов электронной техники, средств вычислительной техники, создана конкурентоспособная продукция приборостроения для удовлетворения потребностей энергетики, металлургической, химической, других отраслей промышленности. Освоено производство средств информатизации для учебных заведений. В стадии завершения разработка средств вычислительной техники на 32—64-разрядных процессорах.

Внедряются в систему товарного и денежного обращения компьютеризованные малогабаритные контрольно-кассовые аппараты с автономным источником питания, специализированные электронные контрольно-кассовые аппараты, расчетные комплексы на базе таких аппаратов и средств вычислительной техники. Разработаны и подготовлены к внедрению в производство цифровой диктофон с голосовым управлением, портативный устный словарь-переводчик, автоматический голосовой телефонный набиратель, компьютерная клавиатура с системой голосового управления и пр.

Разработаны и освоены в производстве компьютерные томографы и рентгеновские диагностические аппараты, новые модификации электронных микроскопов, хроматографов, масс-спектрометров и спектрографов, ряд приборов и систем для экологического мониторинга, промышленные и измерительные приборы, технические средства для АСУ ТП и пр.

Министерства здравоохранения, образования и науки, охраны окружающей природной среды, транспорта и связи, а также Госкомитет природных ресурсов, Государственная гидрометеорологическая служба Украины отмечают, что отечественные приборы по техническим характеристикам отвечают мировым образцам, а по стоимости — значительно (до 50%) дешевле зарубежных аналогов.

В 2002—2004 гг. в ОАО „Квазар”, одном из крупнейших предприятий микроэлектронной отрасли Украины, проведена реконструкция и восстановлено производство интегральных схем по всем прежде освоенным технологиям, организовано производство монокристаллического кремния, изготовление и обработка пластин кремния для микроэлектроники и солнечной энергетики (примерно 10% мирового производства), проведена разработка и организовано производство фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) солнечной энергии в электрическую с КПД 14—16% общей мощностью 10 МВт в год, производство фотоэлектрических модулей общей мощностью 1 МВт в год (номенклатурный ряд от 75 до 150 Вт) и готовых солнечных электростанций для обеспечения южных регионов Украины, а также энергетических программ стран Европы, Африки, Юго-Восточной Азии и Латинской Америки.

Модернизация энергетического оборудования позволила восстановить полный цикл изготовления интегральных микросхем и организовать выпуск возобновляемых источников энергии. Это дало возможность сохранить коллектив высококвалифицированных специалистов в отрасли микроэлектроники, восстановить производство кристаллов интегральных схем (мощности действованы менее чем на 20%) и увеличить реализацию интегральных схем в сравнении с 2003 г. с 3 млн. шт. до 7 млн. шт. За последние годы НПО „Кристалл” (г. Киев) разработало 45 типоназваний интегральных микросхем для конкретных заказчиков. Они внедрены в производство в ОАО „Квазар” и НПО „Интеграл” (г. Минск, Беларусь).

Однако стремительный уровень обновления мирового парка радиоэлектроники и приборостроения требует соответствующих темпов внедрения новой продукции и в Украине, что при сегодняшнем финансово-экономическом состоянии предприятий отрасли невозможно без государственной поддержки. Так, например, в США 1/6 всех бюджетных затрат на науку направлена на развитие микроэлектроники. Кроме того, электронные фирмы выделяют средства на указанные цели от 7 до 25% объемов реализации продукции.

По статистическим данным, в 1991 г. предприятия машиностроения Украины выпустили продукции на \$26 млрд., в то время как металлургическая отрасль

— на \$9 млрд. Сегодня же, как известно, промышленность развивается с противоположными акцентами. Доля машиностроения в ВВП Украины сократилась с 33,7 до 14,4%, а суммарная доля отраслей сырьевого направления увеличилась с 28,6 до почти 70% в 2001 году.

Важным фактором развития отечественной электронной промышленности, как и приборостроения, является сохранение тесных связей с предприятиями и научными организациями Российской Федерации и Беларуси. Подписанный в феврале 2001 г. в г. Днепрпетровске «Меморандум о сотрудничестве в области развития электронной техники» между Минпромполитики Украины и Российским агентством по системам управления заложил прочный фундамент для восстановления отношений между предприятиями электронной отрасли двух стран, а организации, отвечающие за практическое наполнение Меморандума (с российской стороны — ОАО «Российская электроника», с украинской — НПК «Наука») выполнили значительный объем работ по налаживанию прямых контактов и информационного обмена по приоритетным направлениям развития отрасли. К сожалению, по различным причинам в последующем это соглашение не нашло своего широкого развития на межгосударственном уровне.

Сегодня полностью исчерпаны экстенсивные механизмы экономического развития, которые обеспечивали рост экономики страны в последние годы. Для дальнейшего роста экономики необходим переход к ее инновационной модели. Вместе с тем высокие темпы наращивания научно-технического потенциала являются необходимым, но не достаточным условием интенсивной инновационной деятельности. Достаточное условие — это наличие высокого уровня инновационного содействия государства. В Украине это условие, к сожалению, пока практически не выполняется. На современном этапе развития экономики Украины в процессе приватизации доминируют большие монополии и финансово-политические группы, которые пока что не проявляют интереса к отечественным новациям.

Действующее законодательство не учитывает особенности функционирования научной и образовательной сферы. Финансовое положение отраслевых НИИ осложнено в связи с огромной налоговой нагрузкой, включая земельный налог и, кроме налога на прибыль в размере 25%, еще и дивиденды в размере до 50% объема чистой прибыли. В результате значительная часть заработанных учреждениями средств изымается в бюджет.

Ликвидация Государственного инновационного фонда вместе со всей отраслевой и региональной инфраструктурой привела к потере одного из основных источников финансирования отраслевой науки. Отраслевая наука сегодня во многих случаях не востребована, а в ряде направлений вообще прекратила существование. Этому способствовала и принудительная, поспешная приватизация отраслевых научно-исследовательских и проектных институтов.

Как было выяснено в феврале 2003 г. на парламентских слушаниях, имеющийся в Украине опыт

разгосударствления научных учреждений свидетельствует о неединичных случаях отрицательной для интересов государства деятельности новых собственников этих учреждений (массово освобождаются работники, уменьшаются оборотные активы). Фактически вся материальная база предприятий теряет свою первоначальную ценность. Это приводит к потере государством разработок в приоритетных инновационных направлениях экономики.

Существующая практика приватизации ведущих отраслевых научных учреждений оценивается специалистами как убыточная для экономики Украины. На слушаниях была высказана необходимость проведения комплексного исследования указанной проблемы и инвентаризации объектов науки, выделение из них, в первую очередь, научно-исследовательских институтов, которые осуществляют фундаментальные исследования, разработки для стратегически важных областей, оборонной промышленности и других, деятельность которых существенно влияет на безопасность государства. Эта работа до сих пор не проведена.

Отрицательные результаты приватизации усугубляются еще и тем, что до сего времени не решен вопрос относительно оценки стоимости объектов интеллектуальной собственности, в том числе объектов авторского права, ноу-хау, завершенных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, научно-исследовательской документации. Их стоимостный учет в научных учреждениях до сих пор отсутствует, что не дает возможности в полной мере обеспечить надлежащий контроль за их сохранением и использованием. Принятие в июле 2005 г. Закона Украины о защите интеллектуальной собственности не только приближает наше государство к европейским стандартам, но предоставляет возможность материализовать интеллектуальные достижения украинских научных работников и инженеров, тем более что интеллектуальная собственность создавалась в значительной степени за государственные средства.

Приватизация сама по себе не решает проблемы финансирования отраслевой науки. Принятие решений о приватизации научных институтов должно быть подчинено государственной стратегии реформирования научно-технической сферы в условиях рыночных отношений. В этом плане Минпромполитики активно сотрудничает с Комитетом Верховной Рады Украины по вопросам промышленной политики и предпринимательства относительно государственной поддержки наукоемких отраслей промышленности с целью возрождения и дальнейшего развития электронной промышленности и приборостроения в Украине.

Можно отметить следующие проблемные вопросы развития радиоэлектроники в Украине, требующие первоочередного решения.

1. Постоянный дефицит собственных оборотных средств, который вызван, в первую очередь, недостаточными возможностями их пополнения за счет кредитных ресурсов, систематическим невозвращением НДС за экспортированную продукцию, значительным общим налоговым давлением, введением уплаты земельного налога отраслевыми научными организациями, полной открытостью наших рынков для ино-

странских производителей и уменьшением рынков сбыта в странах СНГ (в 2004 г. — порядка 126 млн. грн., прогноз 2005 г. — 114 млн. грн.).

2. Низкая загруженность предприятий (10—30%).

3. Критическое состояние инвестирования производства. На протяжении 10—15 лет практически не обновлялись основные фонды научных учреждений, предприятий и организаций отрасли. Оснащение морально и физически устарело. Предприятия не в состоянии направлять средства на его обновление из собственных прибылей, тем более на подготовку производства новых изделий. А частичное обновление производственных мощностей осуществляется за счет уменьшения оборотных средств (потребность на внедрение в производство только импортозамещающих микросхем составила в 2004 г. 4,6 млн. грн., в 2005 г. — ориентировочно 10,0 млн. грн.).

4. Западные фирмы не проявляют заинтересованности к инвестированию на общих условиях собственных средств в развитие наших производств,

которые относятся к высокотехнологическим (например, эта потребность в 2004—2005 гг. составляла более 240 млн. грн.).

5. На сегодня приборостроительная промышленность Украины практически не обеспечена необходимыми электронными компонентами украинского производства. Отечественные разработчики приборов вынуждены использовать импортную элементную базу для систем, которые обеспечивают обороноспособность страны.

6. Отсутствие стабильного ежегодного бюджетного финансирования разработок новой конкурентоспособной продукции для внедрения в серийное производство на предприятиях отрасли.

Решение этих проблем будет способствовать необходимому развитию радиоэлектроники и приборостроения в Украине и созданию промышленной, бытовой и специальной техники, которая отвечала бы мировому уровню.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ



7-я международная научно-практическая конференция

**«СОВРЕМЕННЫЕ
ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»**

22—26 мая 2006 года

Украина, г. Одесса

- ◆ Прогрессивные информационные технологии и системы искусственного интеллекта
- ◆ Автоматизированные компьютерные системы
- ◆ Обработка сигналов, схемотехника, системотехника в радиоэлектронике
- ◆ Экологический мониторинг
- ◆ Проектирование и производство электронных средств
- ◆ Функциональная электроника. Микро- и нанотехнологии
- ◆ Проблемы подготовки квалифицированных инженерных кадров в области радиоэлектроники и компьютерных систем

С текущей информацией
можно ознакомиться на сайте
<http://tkea.wallst.ru/konfer.html>

Реквизиты для связи
E-mail <tkea@odessa.net>
тел./факс +38 (048) 728-49-46,
тел. +38 (048) 728-18-50.

К. т. н. И. В. ИВАНОВА

Россия, г. С.-Петербург, Северо-Западный гос. заочный
технический университет
E-mail: rilala_spb@mail.ru

Дата поступления в редакцию
20.05—23.06 2005 г.

Оппонент к. т. н. И. А. КИРЕЕВ
(ОНАС, г. Одесса)

АНАЛИЗ МЕТОДОВ СИНДРОМНОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ КОДОВ РИДА–СОЛОМОНА

Сделан вывод о необходимости разработки безрекуррентных процедур декодирования, что возможно с использованием ганкелевых (теплицевых) матриц при вычислении синдромов ошибок.

Как было отмечено в [1], обеспечение достаточной помехоустойчивости в технике передачи информации затруднено сложностью практической реализации устройств декодирования.

Настоящая работа посвящена поиску оптимального способа декодирования кодов Рида–Соломона, представляющих наибольший практический интерес.

Код Рида–Соломона (РС) является циклическим кодом и, следовательно, может быть задан с помощью порождающей или проверочной матриц.

По определению, полином $g(z)$ и матрица H для РС-кода над полем $GF(q=p^r)$ имеют соответственно вид:

$$g(z) = \prod_{i=v}^{i=m+v-1} (z - \alpha^i), \quad m = n - k, \quad n = q - 1; \quad (1)$$

$$H = \begin{bmatrix} \alpha^{v(n-1)} & \alpha^{v(n-2)} & \dots & 1 \\ \alpha^{(v+1)(n-1)} & \alpha^{(v+1)(n-2)} & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha^{(m+v-1)(n-1)} & \alpha^{(m+v-1)(n-2)} & \dots & 1 \end{bmatrix} = [\alpha^{ij}], \quad (2)$$

где α — примитивный элемент поля $GF(q)$;
 $d=(m+1)$ — минимальное кодовое расстояние;
 n — длина кода;
 k — число информационных символов;
 m — число проверочных символов (m — четно);
 $v = 0$ или $v=1$.

Если поле $GF(q)$ имеет характеристику 2, т. е. $q=2^r$, то знак минус в скобках выражения (1) заменяется на плюс:

$$g(z) = (z + \alpha^v)(z + \alpha^{v+1}) \dots (z + \alpha^{m+v-1}), \quad GF(2^r).$$

Минимальное кодовое расстояние РС-кода определяется точным равенством $d=n-k+1$, т. е. он является максимально разделимым (МДР) кодом и способен исправлять до $V_{\max} = 0,5m$ ошибок.

Полином $U(z)$ и, следовательно, кодовое слово $U = (u_{n-1}, u_{n-2}, \dots, u_1, u_0)$ РС-кода в несистематической форме находится из соотношения $U(z) = Q(z)g(z)$, где $Q(z)$ — информационный полином. Для того чтобы получить кодовое слово $U(z)$ в систематической фор-

ме, достаточно найти остаток $R(z)$ от деления полинома $Q(z)$ на $g(z)$ и принять

$$U(z) = Q(z)z^m - R(z). \quad (3)$$

Любое неискаженное кодовое слово U удовлетворяет соотношению $UH^t = 0$. Произведение $U_{\xi}H^t = S$ определяет синдром, причем вектор U_{ξ} , возможно, содержит ошибки. При использовании матрицы H в форме (2), т. е. для РС-кода, синдром S является вектором-изображением усеченного преобразования Фурье–Мэттсона–Соломона для вектора-оригинала U . Компоненты синдрома задаются выражением

$$S_j = \sum_{i=0}^{i=n-1} u_i \alpha^{ij}, \quad n = q - 1. \quad (4)$$

Часто практически удобнее компоненты S_j вычислять по следующей рекурсивной формуле, называемой схемой Горнера:

$$S_j = u_0 + \alpha^j (u_1 + \alpha^j (u_2 + \dots + \alpha^j (u_{n-2} + \alpha^j u_{n-1}) \dots)) \quad (5)$$

где $j=1, 2, \dots, m$.

Можно убедиться, что для не искаженного помехами вектора U все компоненты синдрома S равны нулю.

Классический синдромный метод декодирования во временной области для (n, k) -РС-кода с кодовым расстоянием d состоит из следующих укрупненных этапов:

1. Вычисление синдрома S .
2. Вычисление вектора ошибок; в классическом варианте декодирования этап разбивается на два:
 - 2а. Определение местоположений ошибок l ;
 - 2б. Нахождение величин ошибок ϵ_l .
3. Коррекция кодового вектора.

Охарактеризуем вкратце каждый из этапов.

1. Компоненты синдрома $S = (S_v, S_{v+1}, \dots, S_{m+v-1})$, где $v \in \{0, 1\}$, находятся по формулам (4) или (5). Если все $S_j = 0, j=v, v+1, \dots, m+v-1$, то считаем, что ошибок нет. В противном случае, если $S_j \neq 0$ хоть для одного j , то устанавливаем факт искажения кодового вектора; для его коррекции необходимо найти вектор ошибок, т. е. их местоположение и величину.

2а. Задача определения местоположений ошибок является наиболее трудной, и, как будет видно из дальнейшего, она может быть сведена к решению системы ганкелевых (теплицевых) уравнений, а затем к одному — так называемому уравнению локаторов. Если степень этого уравнения не превышает $0,5m$, а

его решение над полем Галуа существует, причем все корни различны, то позиции ошибок равны обратным значениям корней. При небольшом числе ошибок и, следовательно, невысоком порядке уравнения над полем Галуа его решение может быть найдено, например, табличным методом. В общем случае прибегают к упорядоченному перебору всех возможных значений для его корней; подобный перебор именуется процедурой Ченя [2, 3]. (Автором создан метод декодирования, основанный на вычислении особых продолжений ганкелевых (теплицевых) матриц и вообще не требующий решения указанного уравнения локаторов.)

2б. После того как расположение ошибок установлено, т. е. они перешли в разряд стираний, возникает задача вычисления их величины ϵ_j . Данная задача сводится по существу к решению системы линейных уравнений над полем Галуа относительно ϵ_j . Такая система может быть решена любым стандартным методом, например методами Крамера, Гаусса, обращения матриц. Однако в процедуре декодирования кодов над полями Галуа для вычисления величин ошибок удобнее использовать особые продолжения ганкелевых матриц либо применить формулу Форни [4]

$$\epsilon_i = -\frac{\bar{\omega}(\alpha^{-i})}{\sigma'_z(\alpha^{-i})}, \quad (6)$$

где i — позиция ошибки;
 $\sigma'_z(z)$ — формальная производная полинома $\sigma(z)$ по z ;
 $\sigma'_z(\alpha^{-i})$ и $\bar{\omega}(\alpha^{-i})$ — значения полиномов $\sigma(z)$ и $\bar{\omega}(z)$ в точке $z=\alpha^{-i}$, обратной корню α^i полинома $\sigma(z)$.

Формальная производная для полинома

$$f(z) = \sum_{i=0}^{i=n} a_i z^i = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + \dots + a_n z^n \quad (7)$$

(где коэффициенты a_i — какие-либо числовые параметры выбранного поля) над полем Галуа определяется соотношением

$$f'_z(z) = \sum_{i=1}^{i=n} ((i)) \times (a_i z^{i-1}) = ((1)) \times a_1 + ((2)) \times (a_2 z) + \dots + ((n)) \times (a_n z^{n-1}), \quad (8)$$

где $((i))=1+1+\dots+1$ (i штук, складываемых по правилам данного поля); значком “ \times ” обозначена операция “просуммировать” столько-то раз (эта операция не совпадает с операцией умножения над конечным полем). В данном случае имеем для $GF(2^n)$:

$$\left. \begin{aligned} \text{если } \sigma(z) &= \sum_{i=0}^{i=n} a_i z^i = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + \dots + a_n z^n, \\ \text{то } \sigma'_z(z) &= \sum_{i=0}^{i=\psi} a_{2^i+1} z^{2^i} = a_1 + a_3 z^2 + \dots + a_{2^\psi+1} z^{2^\psi} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где $\psi = \text{int } 0,5(n-1)$.

3. Таким образом, на втором этапе находится вектор ошибок $E=(\epsilon_{n-1}, \epsilon_{n-2}, \dots, \epsilon_0)$. Коррекция искаженного кодового вектора U_ϵ по вектору ошибок E тривиальна — кодовое слово U восстанавливается путем покомпонентного суммирования: $U=U_\epsilon+E$.

Вернемся еще раз к первому этапу. На этом этапе декодирования вычисляются компоненты синдрома S . Однако при этом не известны не только позиции l и величины ϵ_l ошибок, но даже и их число V . Для нахождения перечисленных величин необходимо решить систему из m нелинейных уравнений

$$\sum_{i \in r} \epsilon_i \alpha^{ji} = S_j, \quad j = v, v+1, \dots, m+v-1, \quad r = \{1, 2, \dots, x\},$$

$v \in \{0, 1\}$,

которая может быть приведена к ганкелевой (теплицевой) системе линейных уравнений.

При декодировании кодов над конечными полями наибольшее распространение получили следующие методы решения ганкелевой (теплицевой) системы уравнений:

1) Прямой, или определительный, метод, называемый также методом Питерсона–Горенштейна–Цирлера [2, 3, 5];

2) Итеративный метод Тренча–Берлекэмпа–Мессе (ТБМ-метод), получивший наибольшее применение на практике [6, 7];

3) Метод Сугиямы, основанный на алгоритме Евклида и пригодный для декодирования не только кодов Боуза–Чоудхури–Хоквингема и РС-кодов, но и ряда других альтернативных кодов [8].

Суть первого метода состоит в вычислении ряда угловых квадратных определителей для матрицы и нахождении ее ранга. Затем система уравнений решается каким-либо трафаретным способом — Крамера, Гаусса, обращением матриц и др. К сожалению, прямой метод практически целесообразен лишь при невысоком порядке матрицы, т. е. при декодировании кодов, способных исправлять небольшое число (до 6—8) ошибок.

Два других метода, по существу, позволяют по известному полиному синдромов $S(z)$ решить относительно полиномов $\sigma(z)$ и $\omega(z)$ уравнение Падэ над полем Галуа:

$$S(z)\sigma(z) = \omega(z), \quad \text{mod } z^m. \quad (10)$$

После вычисления корней полинома $\sigma(z)$, а следовательно, и определения локаторов $X_i = \alpha^{li}$ ошибок, их величина ϵ_i может быть рассчитана по формуле Форни (6).

В принципе в полном решении уравнения (10) нет необходимости, т. к. достаточно найти полином локаторов $\sigma(z)$, а по нему — продолжение вектора синдромов.

Как уже отмечалось, в принятом кодовом слове могут содержаться искажения двух типов — стирания, местоположение которых известно, и ошибки, местоположение которых неизвестно. В этом случае удобно различать многочлен $\sigma(z)$ локаторов ошибок, определяемый как и раньше, и многочлен $\Gamma(z)$ локаторов стираний, задаваемый следующим равенством:

$$\Gamma(z) = \prod_{i=1}^{i=\tau} (1 - z\alpha^{li}) = \prod_{i=1}^{i=\tau} (1 - zZ_i),$$

где τ — число стираний;

l_i — позиция i -го стирания;

$Z_i = \alpha^{li}$ — локатор стирания.

Тогда ключевое уравнение Падэ примет вид

$$S(z)\Phi(z) = \omega(z), \quad \text{mod } z^m, \quad (11)$$

где $\Phi(z) = \Gamma(z)\sigma(z)$.

Уравнение (11) можно решить теми же методами, что и уравнение (10), если ввести обобщенный полином синдрома Форни $T(z) = S(z)\Gamma(z)$ по модулю z^m [3, 4]. Полином локаторов ошибок можно найти разделив $\Phi(z)$ на $\Gamma(z)$. В вычислении этого полинома также нет необходимости. Используя «частотный подход», достаточно найти продолжение вектора синдромов S по рекуррентной формуле типа (12) с естественной заменой $\sigma(z)$ на $\Phi(z)$:

$$\sum_{k=0}^{j-1} a_{j-k} \sigma_k = a_j \sigma_0 + a_{j-1} \sigma_1 + \dots + a_{j-n} \sigma_n, \quad (12)$$

где $j > 2n$ — "продолжение вниз", $j < n+1$ — "продолжение вверх".

Соотношение (12) справедливо и при $n+1 \leq j \leq 2n$, но в этом случае оно связывает только известные коэффициенты a_1, a_2, \dots, a_{2n} .

Анализ методов синдромного декодирования кодов Рида–Соломона позволил сделать вывод о необходимости разработки безрекуррентных процедур

декодирования, что и стало возможным с использованием ганкелевых (теплицевых) матриц при вычислении синдромов ошибок.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Иванова И. В. Классификация и синтез полиномиальных кодеков в системах автоматизированной обработки данных // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2005.— № 4.— С. 19—23.
2. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки.— М.: Мир, 1976.
3. Галлагер Р. Теория информации и надежная связь.— М.: Сов. радио, 1974.
4. Форни Д. Каскадные коды.— М.: Мир, 1970.
5. Coppersmith D. Fast evaluation of logarithms in fields of characteristic two // IEEE Transaction on Information Theory.— 1984.— Vol. IT-30, N 4.— P. 583—587.
6. Берлекэмп Э. Алгебраическая теория кодирования.— М.: Мир, 1971.
7. Trench W. F. An algorithm for the inversion of finite Toeplitz matrices // Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics.— 1964.— N 12.— P. 515—522.
8. Suqiyama Y., Kasahara M., Hirasawa S. A method for solving key equation for decoding Goppa codes // Information and Control.— 1975.— N 27.— P. 87—99.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Загидуллин Р. Ш., Карутин С. Н., Смешенко В. Б. SystemView. Системотехническое моделирование устройств обработки сигналов.— М.: Горячая линия–Телеком, 2005.— 294 с., ил.

Изложены основы инженерных методов синтеза и расчета основных классов радиотехнических устройств с использованием пакета программ SystemView компании Elanix, который обеспечивает возможность всестороннего анализа свойств систем, включая алгоритмы аналоговой или цифровой обработки сигналов, синтеза фильтров, анализа и синтеза систем управления и систем связи, моделирования динамических систем на уровне функциональных блоков. Книга содержит необходимый теоретический материал и значительное количество практических примеров. Особенностью книги является то, что изложение ведется не от описания возможностей пакета, а от постановки конкретной радиотехнической задачи.

Для специалистов; может быть полезна студентам радиотехнических специальностей.

НОВЫЕ КНИГИ



Слепов Н. Англо-русский толковый словарь сокращений в области связи, компьютерных и информационных технологий.— М.: Радио и связь, 2005.— 800 с.

Это уникальное издание несомненно вызовет живейший интерес всех, кто работает с современной оригинальной английской технической литературой в области связи и новых информационных технологий, т. к. является самым полным (35 тысяч сокращений) и наиболее современным из словарей подобного рода. Словник словаря формируется уже 15 лет, а данное издание является третьим (первое вышло в 1996 г. — 19000 терминов, второе — в 1999 г. — 26000), и оно кардинально отличается тем, что является англо-русским, а не англо-английским, как два предыдущих.

Словарь можно использовать не только для перевода сокращений, но и как терминологический справочник или как англо-русский словарь для перевода составных терминов. Кроме того, он содержит большой словарь русскоязычных сокращений (около 5100) по той же тематике.

Заказать словарь можно по почте: 125319, Москва, а/я 594, по тел./факсу: (095) 956-3346, 234-0110.

E-mail: knigi@technosphaera.ru; sales@technosphaera.ru

А. Г. ЯЦУНЕНКО

Украина, г. Днепропетровск, Институт технической механики
E-mail: anatoly@ramed.dp.ua

Дата поступления в редакцию
15.07 2005 г.

Оппонент В. И. МАЙ
(НПП "Сатурн", г. Киев)

ПРИНЦИПИАЛЬНО НОВЫЙ ПОДХОД К ИЗГОТОВЛЕНИЮ СВЧ-ЭЛЕМЕНТОВ И УЗЛОВ СИСТЕМ СВЯЗИ И НАВИГАЦИИ

Применение многослойной гальванопластики с разборными матрицами в сочетании с элементами гальванопластического монтажа повышает надежность и технологичность СВЧ-устройств при снижении стоимости изделий.

В качестве основного исходного момента, определяющего разумно необходимую степень интеграции или количества функций, выполняемых конструктивно завершенными СВЧ-модулями, может служить компромисс между стремлением к уменьшению массогабаритных характеристик аппаратуры, удобством и упрощением ее эксплуатации и возможностями технологии ее изготовления, контроля и проверки соответствующих электрических параметров.

Известно, что совершенствование элементной базы, сводящееся лишь к простому объединению различных по функциональному назначению, но изготовленных отдельно СВЧ-узлов, не позволяет существенно улучшить электрические и массогабаритные характеристики аппаратуры, упростить и удешевить технологию ее изготовления и, в конечном счете, повысить эффективность ее использования [1]. В первую очередь этому препятствует большое количество стыковочных узлов. Даже в миллиметровом диапазоне длин волн, из-за того, что существенную долю массы приемопередающей части аппаратуры составляют волноводы, волноводные фланцы и корпуса приборов (с вынужденным применением волноводных фланцев), масса аппаратуры может достигать до 70—80 кг [2].

Разрешение возникшей дилеммы возможно за счет создания многофункциональных модулей, конструкция которых приспособлена для серийного производства. Однако ориентация только на гибридно-интегральную технологию изготовления печатных плат с имплантированными активными элементами не всегда является экономически привлекательной — из-за их неремонтопригодности, а также более низкого, по сравнению с волноводами, допустимого уровня передаваемой мощности.

Альтернативой этой технологии может быть принципиально новая волноводно-интегральная технология, базирующаяся на основе многослойной гальванопластики с элементами гальванопластического монтажа [3, 4]. Помимо существенного выигрыша в мас-

се и габаритах изделий, здесь коренным образом снижаются затраты на регулирование и настройку, т. к. применение метода многослойной гальванопластики обеспечивает не только высокую точность изготовления, но и повторяемость геометрических параметров и электрических характеристик СВЧ-узлов.

Опыт работы в течение ряда лет над решением рассматриваемой сложной, но актуальной проблемы показывает, что тщательно отработанная конструкция матриц многократного использования (матрица — это конструктивно оформленный копир, на котором методом электролитического осаждения формируется соответствующее изделие) в сочетании с технологической оснасткой, обеспечивающей вращивание как металлических, так и неметаллических деталей, позволяет производить практически квазимонолитные СВЧ-модули с достаточно обширным спектром функциональных возможностей. Обеспечивается также легко выполняемая замена полупроводниковых приборов (генераторных, детекторных и смесительных диодов). При этом стремление к унификации конструктива усилительных и генераторных узлов приводит не только (и не столько) к однотипности матриц многократного использования, но и к легкости преобразования усилительного узла в генераторный и наоборот. А это создает оперативный простор, позволяющий реализовать различные схемотехнические решения при разработке квазимонолитных приемопередающих модулей.

При разработке матриц многократного использования и технологической оснастки для изготовления элементов и узлов аппаратуры связи и навигации (в том числе и спутниковой) по предлагаемой технологии необходимо прежде всего определиться: производство каких из них является приоритетным. Безусловно, таковыми являются генераторный и усилительный модули, а также развязывающие устройства — вентили и циркуляторы.

Относительно генераторного модуля следует отметить, что для обеспечения чистоты спектра генерируемых колебаний, а также стабильности частоты и снижения уровня частотных шумов, в нем должна быть предусмотрена система стабилизации частоты. Наиболее просто эта задача решается путем параметрической стабилизации частоты с помощью внешнего высокочастотного резонатора. Основными требованиями, которым должен удовлетворять стабилизирующий резонатор, это высокая добротность и не-

критичность его электрических параметров к отклонениям от номинальных значений при изготовлении (к примеру, отклонений от перпендикулярности продольной оси резонатора относительно торцевых поверхностей). Как известно [5], таким требованиям удовлетворяют биконические резонаторы (к тому же форма оправки для их изготовления органически вписывается в конструктив матрицы многоразового использования, предназначенной для изготовления стабилизированного по частоте, практически монолитного, генераторного модуля).

В некоторых случаях при варьировании нагрузки генератора стабильность его частоты, обеспечиваемая параметрической стабилизацией, может оказаться недостаточной. В этой ситуации для исключения влияния изменения нагрузки на частоту генерируемых колебаний обычно применяют ферритовые развязывающие устройства, разновидностью которых являются волноводные циркуляторы.

Различают симметричные (Y) и несимметричные (T) циркуляторы. Исторически сложилось так, что хотя конструкция T-циркуляторов и проще, Y-циркуляторам посвящено большее количество работ, что связано, скорее всего, с более простым расчетом их электродинамических параметров. Если рассматривать единичные развязывающие элементы (Y- или T-циркуляторы), то оказывается, что путем соответствующего выбора формы и размеров ферритового вкладыша и диэлектрической втулки можно добиться примерно одинаковых электродинамических параметров рассматриваемых элементов, причем система "ферритовый вкладыш — диэлектрическая втулка" для T-циркуляторов по сравнению с Y-циркуляторами оказывается, как правило, сложнее. При одинаковых ферритовых вкладышах T-циркуляторы имеют более узкую полосу частот.

Естественно, что матрица для изготовления T-циркуляторов значительно проще, чем матрица для Y-циркуляторов, но это обстоятельство не является единственно привлекательным при использовании T-циркуляторов. Так, для нескольких каскадно-соединенных циркуляторов в случае реализации такой цепочки посредством Y-циркуляторов возникают отдельные участки сборной матрицы, которые оказываются "замурованными", что делает практически невозможным реализацию матрицы многоразового использования. Вообще создается впечатление, что если на "стержневой" волновод как бы "нанизывать" функциональные узлы, то можно добиться реализации многофункционального устройства как единого целого, используя сборную матрицу многоразового использования, причем главное условие при этом сводится к тому, чтобы каждый отдельно функционирующий узел был электродинамически связан со "стержневым" волноводом через его боковые поверхности.

Для иллюстрации возможностей предлагаемой технологии изготовления элементной базы аппаратуры связи и навигации на рис. 1 представлены некоторые СВЧ-элементы и многофункциональные узлы на их основе, выполненные методом гальванопластики и гальванопластического монтажа. При создании этого демонстрационного набора СВЧ-устройств авто-

К рис. 1.

1. Излучающий модуль с рупорной антенной и ферритовой развязкой генератора.
2. Диэлектрическая линза.
3. Излучающий модуль с рупорной антенной и генератором, стабилизированным по частоте биконическим резонатором.
4. Излучающий модуль с рупорной антенной, ферритовым Y-циркулятором и смесительной камерой.
5. КВЧ-генератор на диоде Ганна с двухкаскадным усилителем мощности на ливонно-пролетном диоде (ЛПД).
6. Излучающий модуль со стабилизированным по частоте генератором, ферритовой развязкой и направленным ответвителем для контроля мощности генератора.
7. Излучающий модуль с ферритовой развязкой и направленным ответвителем.
8. Крестообразный направленный ответвитель.
9. Стабилизирующий биконический резонатор в разобранном виде.
10. Цепочка Y-циркуляторов.
11. Y-циркулятор.
12. T-циркулятор.
13. Генераторы для КВЧ-терапии (с узкой и широкой полосой перестройки).
14. Параболический отражатель.

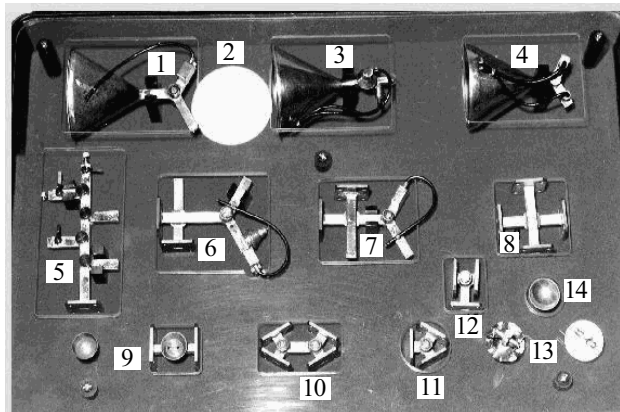


Рис. 1. Демонстрационный набор элементов и узлов аппаратуры связи и навигации КВЧ-диапазона

ром преследовалась цель не только показать потенциальные возможности предложенной технологии, но и проиллюстрировать, что разработанные элементы и узлы аппаратуры связи и навигации превосходят существующие не только по массогабаритным, но и по электродинамическим показателям (или, по крайней мере, они не хуже известных аналогов).

Относительно некоторых электрических параметров изготовленных изделий можно сказать следующее.

Так, сравнительная оценка долговременной нестабильности стандартного генератора СВЧ Г4-141 и генератора на диоде Ганна, изготовленного методом гальванопластики (рис. 2, а), которая проводилась с помощью анализатора спектра С4-60 в режиме запоминания по ширине заштрихованной (сигналами сравниваемых генераторов) области на экране электронно-лучевой трубки, показала, что стабильность частоты изготовленного генератора с применением стабилизирующего биконического резонатора (рис. 2, б) оказывается на порядок выше, чем у серийно выпускаемого Г4-141. На рис. 2, в представлен автодинный преобразователь частоты КВЧ-диапазона на дио-

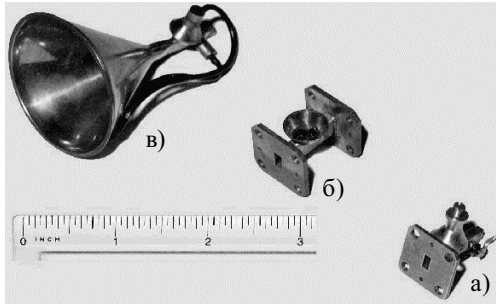


Рис. 2. Элементы и узлы КВЧ-диапазона: *a* — генератор на диоде Ганна со стабилизирующим биконическим резонатором; *b* — биконический резонатор в разобранном виде; *c* — автодинный преобразователь частоты на диоде Ганна с рупорной антенной

де Ганна. Стабилизация частоты автодинного преобразователя осуществляется с помощью электрически перестраиваемого биконического резонатора.

Следует отметить, что на основе отработанной матрицы Т-циркулятора была изготовлена более сложная матрица многоразового использования, предназначенная для изготовления многофункционального устройства, которое представляет собой генератор на диоде Ганна с двухкаскадным усилителем мощности на ЛПД. При этом в качестве развязывающих элементов использовались уже упомянутые Т-циркуляторы. Общий вид этого устройства показан на рис. 3. Представленное устройство может быть легко трансформировано (за счет конструктивных изменений матрицы) в передающий модуль, содержащий генератор на диоде Ганна (со стабилизацией частоты с помощью электрически перестраиваемого биконического резонатора), в упомянутые усилители и рупорную антенну. Аналогичным образом может быть изготовлен приемный модуль, содержащий рупорную антенну, малощумящий усилитель и автодинный преобразователь частоты на диоде Ганна. Приемный и передающий модули выполнены как конструктивно завершенные монолитные изделия, которые не содержат ни единого фланцевого соединения.

Нельзя не упомянуть еще об одном важнейшем достоинстве описываемых здесь технологических решений при изготовлении СВЧ-элементов и узлов — их высоконадежной герметичности. Это достигается благодаря отсутствию фланцевых соединений в

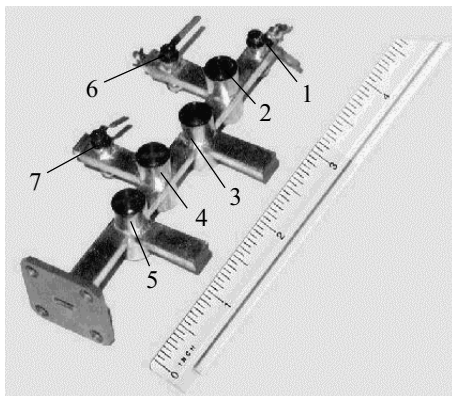


Рис. 3. КВЧ-генератор с двухкаскадным усилителем мощности:

1 — генератор на диоде Ганна; *2—5* — Т-циркуляторы; *6, 7* — усилители мощности на ЛПД

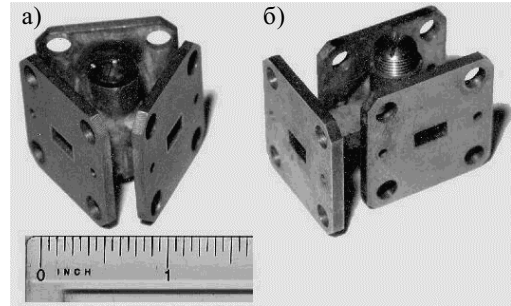


Рис. 4. Волноводные Y-циркулятор (*a*) и Т-циркулятор (*b*) КВЧ-диапазона длин волн

монолитной конструкции, содержащей металлостеклянные гермовводы сигналов управления и вакуумноплотные СВЧ-вводы, вмонтированные в конструкцию при гальванопластическом монтаже. Такое решение гарантирует долговременную работу системы в целом с сохранением заданных технических характеристик, а также позволяет не герметизировать корпуса активных полупроводниковых элементов (что само по себе сложнейшая проблема, особенно в верхнем участке КВЧ-диапазона).

На рис. 4 крупным планом и в несколько ином ракурсе, чем на рис. 1, показаны Y- и Т-циркуляторы, изготовленные методом гальванопластического монтажа.

Выводы

Результаты проведенной практической работы подтверждают, что изделия, изготовленные по предлагаемой технологии с применением тщательно отработанных матриц многоразового использования в сочетании с технологической оснасткой, не только обладают положительными качествами традиционных полосковых линий и металлических полых волноводных систем, но и превосходят их по своим техническим, эксплуатационным и другим характеристикам, не имея при этом присущих им недостатков.

Установлено, что эта технология позволяет повысить качество, надежность и технологичность изделий, уменьшить их массу в 10—100 раз, а габариты — в 2—4 раза.

Кроме того, применение многослойной гальванопластики с разборными матрицами многоразового использования в сочетании с элементами гальванопластического монтажа позволит существенно снизить стоимость готовых изделий при серийном производстве.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Гассанов Л. Г., Липатов А. А., Марков В. В. и др. Твердотельные устройства СВЧ в технике связи. — М.: Радио и связь, 1988.
2. Алыбин В. Г. Пути построения современных СВЧ-устройств для радиорелейных линий и спутниковых средств связи / 5-я Крымская конференция и выставка "СВЧ-техника и спутниковые телекоммуникационные технологии". — Севастополь. — 1995. — С. 11.
3. Яценко А. Г., Привалов Е. Н. Новая волноводно-интегральная технология для бортовой аппаратуры мм-диапазона / 2-я Междунар. конф. "Спутниковая связь". Т. II. — Москва. — 1996. — С. 145.
4. Yatsunenkov A. G., Privalov E. N., Prokhorov E. F. Solid-state millimeter-wave devices based on waveguide integration technology, proceedings / 5th International Symposium on Recent Advances in Microwave Technology. — Kiev (Ukraine). — 1995. — P. 154—158.
5. Привалов Е. Н. О собственной добротности биконического резонатора / В кн.: Электродинамика и физика СВЧ. — Днепропетровск: ДГУ, 1983. — С. 45—48.

К. ф.-м. н. К. В. КОЛЕЖУК, д. ф.-м. н. В. Н. КОМАЩЕНКО,
Н. В. ЯРОШЕНКО, Г. И. ШЕРЕМЕТОВА, А. С. МАЙСТРЕНКО

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников
им. В. Е. Лашкарёва
E-mail: komas@isp.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
07.07 2005 г.

Оппонент к. ф.-м. н. В. А. БОРЩАК
(ОНУ им. И. И. Мечникова, г. Одесса)

ЭКСПРЕССНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНАХ УФ-А И УФ-В+С

Предложены метод и портативный прибор для измерения мощности ультрафиолетовой радиации в «мягком», «эритемном» и «жестком» диапазонах спектра.

Ультрафиолетовое (УФ) излучение Солнца в спектральной области 200—400 нм принято разделять на три поддиапазона [1]: УФ-А (320—400 нм) — «мягкое» УФ-излучение; УФ-В (280—320 нм) — «эритемное», биологически активное УФ-излучение (активизирует биологические процессы в живых клетках); УФ-С (200—280 нм) — «жесткое» УФ-излучение (угнетает биологические процессы, приводит к возникновению злокачественных опухолей кожи и меланом). Поэтому измерение мощности УФ-излучения в указанных спектральных областях является актуальной проблемой.

Использование традиционных полупроводниковых УФ-сенсоров (например кремниевых) и набора специальных (и — дорогостоящих) интерференционных фильтров позволяет, в принципе, создавать приборы, селективно регистрирующие УФ-А-, УФ-В- и УФ-С-излучение. Однако при этом вступают в противоречие требования обеспечения надежности измерений, портативности прибора и его себестоимости. Так, даже один интерференционный фильтр в несколько раз уменьшает величину полезного сигнала сенсора. Кроме того, интерференционные фильтры имеют вторичные максимумы пропускания, которые нужно подавлять другими фильтрами, что еще более снижает величину полезного сигнала и усложняет решение задачи. К тому же такой прибор будет дорогим.

В настоящей работе описан простой метод измерения мощности ультрафиолетовой радиации Солнца в УФ-А- и УФ-В+С-диапазонах спектра и портативный прибор, его реализующий.

Мощность поглощенного сенсором оптического излучения определяется соотношением:

$$P_{\Delta\lambda} = \frac{I_{\phi}}{S_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \mathfrak{R}(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

где I_{ϕ} — интегральный фототок сенсора, спектральная чувствительность которого ограничена диапазоном длин волн $\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$;

S_0 — площадь его фотоактивной поверхности;
 \mathfrak{R} — чувствительность сенсора.

Ранее сообщалось [2] о разработанных нами селективных и широкополосных УФ-сенсорах на основе многослойных гетероструктур широкозонных соединений A^2B^6 . Отличительной особенностью таких фотоприемников является отсутствие чувствительности к видимому и инфракрасному излучению без применения специальных оптических фильтров.

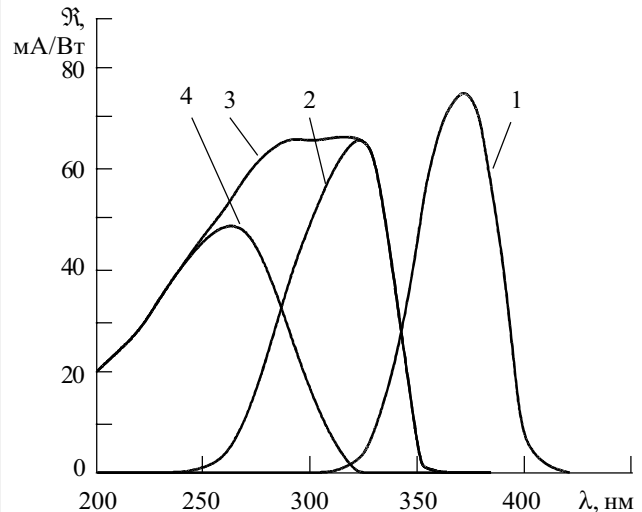


Рис. 1. Абсолютная спектральная чувствительность использованных УФ-сенсоров ($T=300$ К, эффективная активная поверхность сенсоров $S_0=0,045$ см²):
1 — SUUV-5; 2 — SUUV-2; 3 — SUUV-1; 4 — гипотетический сенсор, чувствительный в УФ-В+С-диапазонах

На рис. 1 представлены зависимости $\mathfrak{R}=f(\lambda)$ трех из описанных в [2] сенсоров. Как видно, область спектральной чувствительности сенсора SUUV-5 (кривая 1) соответствует УФ-А-поддиапазону (на уровне 5% от \mathfrak{R}_1^{\max}). Легко показать (с помощью, например, графического интегрирования), что в этом случае мощность падающего на сенсор УФ-А-излучения равна

$$P_A = I_{\phi 1} / (S_0 \mathfrak{R}_1^{\max} F_1), \quad (2)$$

где $I_{\phi 1}$ — интегральный, экспериментально измеренный в режиме «короткого замыкания», фототок сенсора SUUV-5, мА;

\mathfrak{R}_1^{\max} — чувствительность в максимуме кривой 1 рис. 1, мА/Вт;

F_1 — коэффициент, $F_1 = S_1 / S_2$;

S_1 — площадь под кривой 1 в интервале $\lambda = 320 \dots 400$ нм;

S_2 — площадь прямоугольника, в который вписана кривая 1 (в интервале $\lambda = 320 \dots 400$ нм).

Мощность ультрафиолетового излучения в спектральной области УФ-В+С можно определить следующим образом. Кривые 2 и 3 на рис. 1 относятся к сенсорам SUV-2 и SUV-1, соответственно. Фоточувствительные элементы сенсоров изготовлены на основе одного и того же полупроводникового материала, поэтому спектральный ход длинноволнового крыла зависимостей $\mathfrak{R}_2=f_2(\lambda)$ и $\mathfrak{R}_3=f_3(\lambda)$ у них идентичен. Кроме того, сенсоры отобраны таким образом, что положение и величины максимумов функций $f_2(\lambda)$ и $f_3(\lambda)$ совпадают при $\lambda=320$ нм. Произведя поточечное вычитание зависимостей $\mathfrak{R}_3=f_3(\lambda)$ и $\mathfrak{R}_2=f_2(\lambda)$, получим функцию $f_4(\lambda)$. Кривую $\mathfrak{R}_4=f_4(\lambda)$ можно считать спектральной зависимостью гипотетического селективного сенсора, чувствительного лишь в диапазоне длин волн 200—320 нм (рис. 1, кривая 4).

Рассуждая аналогично вышеприведенному случаю определения P_A , запишем мощность УФ-излучения в диапазоне $\lambda < 320$ нм:

$$P_{B+C} = (I_{\Phi 3} - I_{\Phi 2}) / (S_0 \mathfrak{R}_4^{\max} F_4) \text{ мВт/см}^2, \quad (3)$$

где $I_{\Phi 3}$ — интегральный фототок сенсора SUV-1;
 $I_{\Phi 2}$ — интегральный фототок сенсора SUV-2 (для всех использованных сенсоров $S_0=0,045 \text{ см}^2$);
 \mathfrak{R}_4^{\max} — чувствительность в максимуме кривой 4 рис. 1;
 $F_4 = S_4/S_5$;
 S_4 — площадь под кривой 4 в интервале $\lambda=200\dots 320$ нм;
 S_5 — площадь прямоугольника, в который вписана кривая 4 (в интервале $\lambda=200\dots 320$ нм).

Отметим, что при обычных условиях (воздушная масса AM1,5 и отсутствие “озоновой дыры”) на земную поверхность не проникает излучение Солнца с $\lambda < 295$ нм. Это значит, что описанным методом мы измеряем, по сути, эритемную радиацию. Необходимо заметить также, что все полупроводниковые фотоприемники чувствительны в длинноволновой области за краем фундаментального поглощения использованного полупроводника (для разных типов приемников доля этой чувствительности составляет примерно 1—0,01 % от \mathfrak{R}^{\max}). В то же время интегральная мощность солнечного излучения вне пределов УФ-диапазона значительно превышает (более двух порядков величины) мощность ультрафиолетовой радиации. По указанным причинам точность измерения УФ-радиации в значительной мере определяется качеством блокировки длинноволновой составляющей.

Одной из важных характеристик предлагаемого метода определения мощности ультрафиолетового излучения в спектральном диапазоне УФ-В+С является исключение возможного вклада длинноволновой компоненты солнечного спектра ($\lambda > 320$ нм).

Описанный метод реализован в созданном портативном измерителе мощности ультрафиолетового излучения в диапазонах УФ-А и УФ-В+С. Блок-схема прибора представлена на рис. 2.

Выносная головка 1, в которой смонтированы три специально подобранных градуированных УФ-сенсора (SUV-1, SUV-2 и SUV-5), установлена на шар-

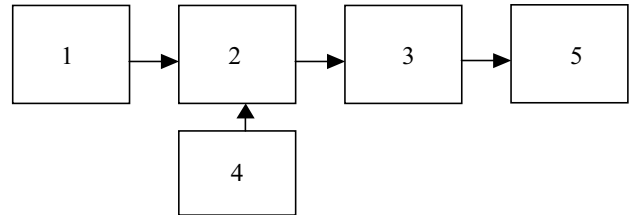


Рис. 2. Блок-схема измерителя УФ-мощности: 1 — выносная головка с тремя сенсорами; 2 — усилитель-преобразователь тока в напряжение; 3 — микроконтроллер; 4 — блок питания; 5 — ЖКИ-экран

нирном штативе, позволяющем фиксировать положение головки в телесном угле 180° . Так как сами сенсоры являются фотопреобразователями и на солнечном свете без приложенного к ним напряжения вырабатывают ток 0,1—2,0 мкА, то для правильного определения мощности УФ-излучения в указанных диапазонах нужно установить плоскость выносной головки прибора перпендикулярно УФ-излучению. Микроконтроллер 3 позволяет преобразовать сигнал в цифровой вариант с последующей обработкой этого сигнала в соответствии с формулами (2) и (3). При этом величины $(S_0 \mathfrak{R}_1^{\max} F_1)$ и $(S_0 \mathfrak{R}_4^{\max} F_4)$ определяются во время отбора и градуировки сенсоров и являются индивидуальными константами для каждого прибора. Блок питания 4 может быть представлен в виде солнечной батареи или малогабаритного аккумулятора. ЖКИ-экран 5 представляет результат измерений мощности УФ-излучения в УФ-А- и УФ-(В+С)-диапазонах в мВт/см².

Динамический диапазон измерений составляет $4 \cdot 10^{-5}$ — 40 мВт/см². Натурные испытания (естественное солнечное освещение, безоблачный летний полдень, широта г. Киева) позволили получить следующие значения мощности солнечной радиации: $P_A=7$ мВт/см²; $P_{B+C}=P_B=0,3$ мВт/см². Полученные результаты удовлетворительно согласуются с данными, опубликованными в [3, с. 183].

Таким образом, предложены метод и портативный прибор для измерения мощности ультрафиолетовой радиации Солнца в УФ-А- и УФ-В+С-диапазонах. Созданный прибор может быть использован как для специального мониторинга УФ-излучения Солнца (например, для фиксирования появления “озоновой дыры”), так и для индивидуального контроля уровня опасной для здоровья эритемной радиации.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Yang W., Vispute R. D., Choopun S. et al. Ultraviolet photoconductive detector based on epitaxial $Mg_{0,34}Zn_{0,66}O$ thin films // Appl. Phys. Lett.— 2001.— Vol. 78, N 18.— P. 2787—2789.
2. Колежук К. В., Комащенко В. Н., Шереметова Г. И. и др. Новое поколение фотоприемников ультрафиолетового излучения // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2003.— № 3.— С. 51—52.
3. Колтун М. М. Солнечные элементы.— М.: Мир, 1987.

Д. т. н. В. М. ШАРАПОВ, к. т. н. М. П. МУСИЕНКО

Украина, Черкасский гос. технологический университет
E-mail: v_sharapov@rambler.ru

Дата поступления в редакцию
04.02 2005 г.

Оппонент д. т. н. В. В. НОВИКОВ
("Авангард-Элионика", г. С.-Петербург)

НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Разработаны новые типы пьезокерамических датчиков линейных и вибрационных ускорений, вязкости, звукового давления, электроакустики и др.

Пьезокерамические датчики широко применяются для измерения многих физических величин — силы, динамического и статического давления, линейных и вибрационных ускорений, вязкости и др. [1, 2]. Они обладают высокой чувствительностью и жесткостью (ничтожная деформация при нагрузке), малыми габаритами и массой, высокой помехозащищенностью, малым уровнем собственных шумов, повышенной радиационной стойкостью, технологичностью изготовления и т. д.

Однако пьезокерамические датчики обладают и недостатками — сравнительно узким рабочим частотным диапазоном (который ограничен сверху резонансной частотой), относительно малой температурной и временной стабильностью параметров, точностью и др.

Широкое применение нашли так называемые биморфные пьезопреобразователи (т. е. состоящие из двух пьезоэлементов — «симметричные» биморфные пьезоэлементы), что позволило на порядок (а не в два раза!) повысить чувствительность, но при этом был сужен частотный диапазон. Замена одного пьезоэлемента на металлическую пластину (асимметричный биморфный пьезоэлемент) повысила механическую прочность пьезоэлемента.

В данной работе описан разработанный авторами комплекс пьезокерамических датчиков с улучшенными техническими и метрологическими характеристиками.

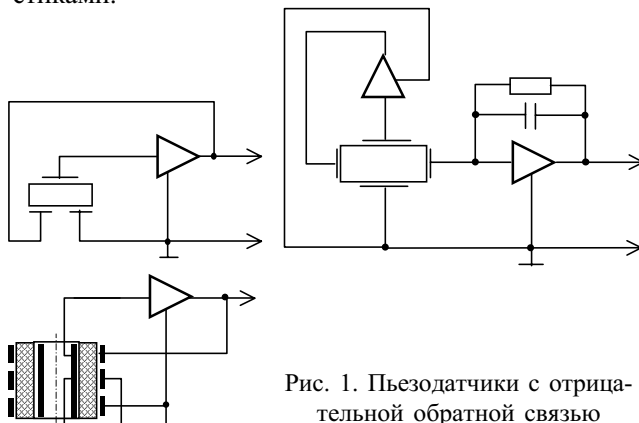


Рис. 1. Пьезодатчики с отрицательной обратной связью

Для повышения точности, температурной и временной стабильности, расширения рабочего диапазона частот было предложено вводить пространственную электромеханическую отрицательную обратную связь (ООС) [3, 4]. Некоторые примеры схем датчиков с ООС показаны на рис. 1.

ООС может быть введена с помощью дополнительных электродов на пьезоэлементе или с помощью дополнительных пьезоэлементов, расположенных планарно или компланарно с основным пьезоэлементом. Амплитудно-частотные характеристики для преобразователей с ООС и без нее при разных значениях коэффициента усиления усилителя напряжения K_{yc} представлены на рис. 2.

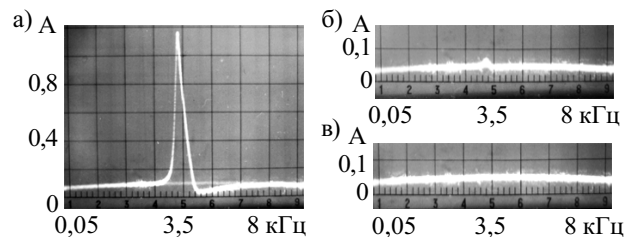


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики пьезопреобразователей:

а — без ООС; б — с ООС ($K_{yc}=8$); в — с ООС ($K_{yc}=7$)

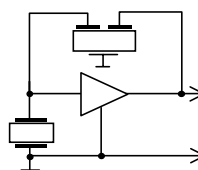


Рис. 3

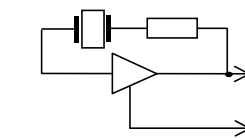


Рис. 4

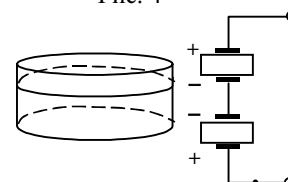


Рис. 5

Авторами разработан и ряд других методов линеаризации амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) пьезокерамических датчиков, что приводит к расширению рабочего диапазона всей контрольно-измерительной системы в целом [5]. Линеаризация АЧХ достигается за счет использования в цепи ООС пьезотрансформаторов (рис. 3), электрического демпфирования колебательной системы добавочными резисторами (рис. 4), встречного включения дополнительных пьезоэлементов различной толщины (рис. 5).

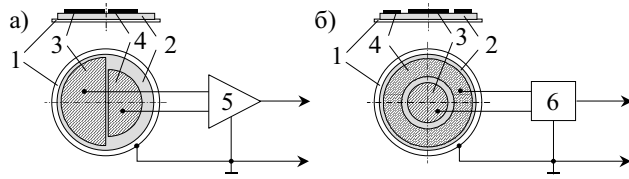


Рис. 6. Пьезокерамические датчики с расширенным рабочим диапазоном частот:

1 — металлическая пластина; 2 — пьезоэлемент; 3, 4 — электроды; 5 — дифференциальный усилитель; 6 — делитель напряжения

Интересным является метод расширения рабочего диапазона частот за счет вычитания (рис. 6, а) или деления (рис. 6, б) двух напряжений, которые образуются в одном пьезоэлементе от электродов с разными размерами и формой [6, 7].

Создание триморфных пьезоэлементов (т. е. состоящих из металлической пластины и двух пьезоэлементов) и включение одного из пьезоэлементов в цепь обратной связи усилителя дает возможность не только активно управлять чувствительностью, но и расширить частотный диапазон за счет подавления резонансных пиков, повысить точность пьезопреобразователей и др. [3, 8]. В зависимости от расположения пьезоэлементов и металлической пластины, а также схемы включения этих пьезоэлементов в цепь усилителя, могут быть получены симметричные и асимметричные планарные и компланарные преобразователи (18 схем), обладающие характеристиками как резонансных, так и апериодических элементов.

Для управления характеристиками резонансных пьезопреобразователей может быть использована как отрицательная обратная связь, так и впервые примененные одним из авторов еще в 1976 г. ультразвуковые концентраторы [9].

Перспективными методами улучшения характеристик пьезокерамических датчиков (ПД) являются конструктивные изменения самого пьезоэлемента. Характеристики пьезоэлемента зависят от взаимного расположения трех векторов — вектора поляризации P , вектора действующей на пьезоэлемент силы F , а также вектора напряженности электрического поля выходного сигнала E (рис. 7) [10].

Традиционные ПД, в которых все три вектора параллельны (рис. 7, а), являются колебательными системами с высокой добротностью и узким рабочим диапазоном частот (рис. 7, б). Если оставить

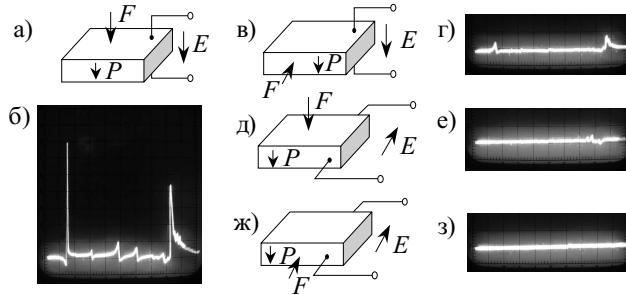


Рис. 7. Типы и их пьезокерамических датчиков АЧХ: а — традиционный и его АЧХ (б); в — поперечный и его АЧХ (г); д — доменно-диссипативный и его АЧХ (е); ж — поперечный доменно-диссипативный и его АЧХ (з)

вектор поляризации P неизменным, а направления двух других изменять, то можно получить 9 комбинаций взаимного расположения векторов. Например если вектор F перпендикулярен векторам P и E , то такой преобразователь называют поперечным (рис. 7, в, г). Если вектор E перпендикулярен векторам P и F (рис. 7, д), то такой преобразователь будет представлять собой дифференцирующую цепь с инерционными свойствами и широким рабочим диапазоном частот (рис. 7, е). (Он был назван авторами доменно-диссипативным ПД.) Если векторы E и F перпендикулярны вектору P (рис. 7, ж), такой преобразователь назван поперечным доменно-диссипативным ПД. Он обладает наибольшей линейностью АЧХ и шириной рабочего диапазона (рис. 7, з).

Таким образом, выбирая направления векторов P , F и E , из одного пьезоэлемента можно синтезировать 27(!) вариантов датчиков с принципиально отличающимися свойствами.

Большой интерес представляют доменно-диссипативные пьезодатчики (ДДП) с обратной связью. Авторами было установлено, что введение обратной связи в доменно-диссипативные преобразователи позволяет изменять чувствительность, а также изменять постоянную времени переходного процесса, превращая тем самым колебательный пьезоэлемент в дифференцирующие инерционные, дифференцирующие идеальные и идеальные усилительные звенья [11]. Кроме того, было определено, что наибольшей линейностью амплитудно-частотной характеристики обладает ДДП, у которого все три вектора напряженности электрического поля — возбуждающего напряжения $E_{ген}$, электрического поля выходного сигнала $E_{вых}$ и обратной связи $E_{ос}$ — перпендикулярны вектору поляризации P .

Авторами разработан ряд конструкций пьезокерамических акселерометров, характеристики которых не уступают характеристикам образцов зарубежных фирм-лидеров. В некоторых конструкциях этих акселерометров отсутствуют традиционные для них инерционная масса и упругий элемент. Разработанные акселерометры имеют ряд достоинств: они просты, имеют малые габариты, узкую диаграмму направленности, широкую полосу частот, повышенную точность.

Некоторые конструкции акселерометров показаны на рис. 8 [12]. Для уменьшения боковой чувствительности предложено использовать конструкции с

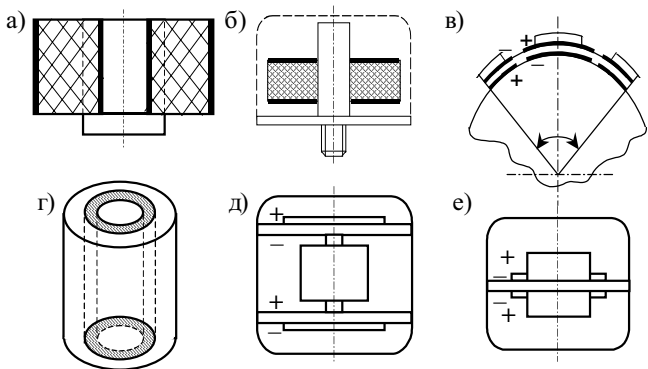


Рис. 8. Конструкции акселерометров

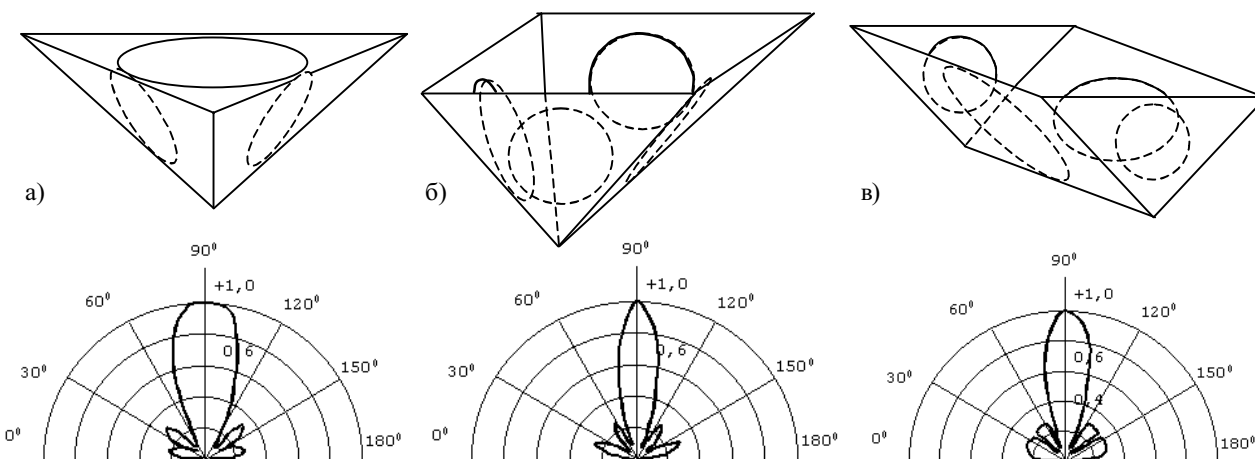


Рис. 9. Объемные излучатели на основе биморфных пьезоэлектрических преобразователей в виде треугольной пирамиды (а, 11 кГц), прямоугольной пирамиды (б, 11,6 кГц) и призмы с треугольными и прямоугольными преобразователями (в, 11,5 кГц)

полной осевой симметрией (рис. 8, а, б). Узкой диаграммой направленности обладают акселерометры с основанием в виде шара с пьезоэлементами в виде сферических сегментов (рис. 8, в). Повышение чувствительности достигается за счет использования деформации на срез (рис. 8, а, б, з). Большею чувствительностью обладают биморфные (рис. 8, д) и триморфные (рис. 8, е) акселерометры.

Другой областью применения пьезодатчиков является электроакустика. Широко известны биморфные электроакустические пьезодатчики с круглыми пьезоэлементом и металлической пластиной. Однако такие преобразователи имеют сравнительно низкую чувствительность с расщепленной диаграммой направленности.

Сужения диаграммы направленности удалось достичь за счет изменения формы металлической пластины. Кроме того, выбором оптимального соотношения площадей пьезоэлемента и пластины достигается увеличение чувствительности преобразователей. Еще более узкая диаграмма направленности достигается за счет использования объемных конструкций, которые показаны на рис. 9 [13].

Разработаны также новые способы и устройства для измерения диссипативных характеристик жидкостей и механического контакта [14].

Разработанные датчики физических величин обладают более высокими техническими и метрологическими характеристиками — точностью, стабильностью, широкой рабочей полосой частот, узкой диаграммой направленности. По результатам разработок получено около 100 патентов СССР, РФ и Украины, опубликовано более 100 научных работ.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Шарапов В. М., Минаев И. Г., Мусиенко М. П. и др. Пьезоэлектрические преобразователи.— Черкассы: ЧГТУ, 2004.
2. Джагунов Р. Г., Ерофеев А. А. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления.— СПб: Политехника, 1994.

3. Sharapov V., Sarvar I., Chudaeva I., Musienko M. The electromechanical feed-back in piezoceramic sensors and transducers / IEEE. International Ultrasonics Symposium.— Sendai, Japan.— 1998.— P. 328.

4. Шарапов В. М., Чудаева И. Б., Мусиенко М. П. и др. Обратная связь в пьезоэлектрических преобразователях механических величин // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.— 1999.— № 2.— С. 64—67.

5. Шарапов В. М., Балковская Ю. Ю. Методы линеаризации АЧХ пьезокерамических преобразователей // Вісник Черкаського держ. технологіч. ун-ту.— 2002.— № 4.— С. 48—52.

6. Пат. 61500 А України. П'єзоелектричний перетворювач механічних величин / В. М. Шарапов, М. П. Мусієнко, Ю. Ю. Балковська.— 2003.— Бюл. № 11.

7. Пат. 61501 А України. П'єзоелектричний перетворювач механічних величин / В. М. Шарапов, М. П. Мусієнко, Ю. Ю. Балковська.— 2003.— Бюл. № 11.

8. Шарапов В. М., Лега Ю. Г., Мусиенко М. П. и др. Исследование симметричных компланарных триморфных пьезопреобразователей давления с обратной связью // Вісник Черкаського інженерно-технологіч. ін-ту.— 2001.— № 2.— С. 33—38.

9. Шарапов В. М., Лега Ю. Г., Мусиенко М. П. и др. Резонансные пьезопреобразователи с ультразвуковыми концентраторами // Там же.— 1999.— № 3.— С. 30—34.

10. Шарапов В. М., Мусиенко М. П., Балковская Ю. Ю. Об одной классификации пьезокерамических преобразователей // Вісник Черкаського держ. технологіч. ун-ту.— 2003.— № 3.— С. 116—120.

11. Шарапов В. М., Мусиенко М. П. Доменно-диссипативные пьезоэлектрические преобразователи с обратной связью // Там же.— 2004.— № 1.— С. 74—79.

12. Шарапов В. М., Мусиенко М. П., Бондаренко Ю. Ю., Кисиль Т. Ю. Пьезокерамические акселерометры // Мат-лы II междунар. науч.-практич. конф. «Вибрация машин: измерение, снижение, защита».— Донецк.— 2004.— С. 40—43.

13. Шарапов В. М., Роттэ С. В. Исследование объемных пьезоэлектрических излучателей на основе асимметричных биморфных преобразователей // Вісник Черкаського держ. технологіч. ун-ту.— 2002.— № 2.— С. 53—58.

14. Шарапов В. М., Кисиль Т. Ю. Об одном способе измерения фактической площади контакта // Там же.— С. 84—87.

Д. ф.-м. н. Ю. М. ШВАРЦ, П. А. ЯГАНОВ, В. Г. ДЗЮБА

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва;
НТУУ "Киевский политехнический институт"
E-mail: shwarts.isp.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
06.06 2005 г.
Оппонент к. т. н. А. О. ДРАНКОВА
(ОНИУ, г. Одесса)

НЕЙРОСЕТЕВАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ТЕРМОМЕТРИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИОДНОГО СЕНСОРА

Впервые предложен нейросетевой алгоритм обработки экспериментальных данных, что позволило повысить точность аппроксимации до 1,5 мК в диапазоне температур 4,2—357 К.

Для математического описания термометрических характеристик (ТМХ) широкодиапазонных диодных сенсоров температуры (ДСТ) используют полиномы Чебышева [1], сплайн-функции [2], комбинации сплайн-интерполяции и аппроксимации с использованием ортогональных полиномов Чебышева [3]. Предложенный в [4] метод многофакторного анализа позволяет получить высокоточную аппроксимацию ТМХ без учета требования постоянства прямого тока ДСТ. Все это свидетельствует о том, что совершенствование методов аппроксимации термометрических характеристик широкодиапазонных высокоточных термодиодных датчиков, удовлетворяющих основным критериям оптимальности, продолжается.

Актуальной задачей является поиск метода наилучшей аппроксимации для кремниевых ДСТ. Это обусловлено тем, что если описание ТМХ на высокотемпературном участке (130—500 К) методом степенных полиномов или полиномов Чебышева дает вполне удовлетворительный результат, то в области криогенных температур из-за особенностей экспериментальных ТМХ (обусловленных резким и немонотонным изменением температурной зависимости чувствительности) необходимо проводить аппроксимацию на отдельных участках. На границах этих участков неизбежно возникает снижение точности аппроксимации, которая не всегда может быть решена удовлетворительно. Критерием качества в этом случае служит дифференцируемость выбранного уравнения математической модели в области определения ТМХ. Использование для этих целей, например, ортогональных полиномов Чебышева, медленно сходящихся в широком диапазоне измеряемых диодным сенсором температур, приводит к излишне громоздкому полиному степени от 218 и выше.

В работе представлен нейросетевой метод аппроксимации ТМХ термодиодного сенсора, ранее не использовавшийся для решения подобных задач в термометрии. Также продолжено исследование возможностей полиномиальной аппроксимации методом регрессионного анализа, начатых в [4], и проведен сравнительный анализ этих методов.

Регрессионный анализ ТМХ

Традиционно представление ТМХ температурных сенсоров осуществляют степенным полиномом, порядок которого определяется требуемой точностью измерения физической величины. Наиболее распространенным способом определения коэффициентов полинома является метод наименьших квадратов, а матричная форма его реализации позволяет автоматизировать процесс с использованием ПЭВМ, так как подпрограммы матричной алгебры входят в пакет Microsoft Office.

Для моделирования ТМХ, устанавливающей связь между падением напряжения на $p-n$ -переходе U и температурой T при фиксированном рабочем токе, был использован метод регрессионного анализа [4], в соответствии с которым коэффициенты аппроксимирующего полинома вида $U=b_0+b_1T+b_2T^2+b_3T^3+b_4T^4+b_5T^5+b_6T^6+b_7T^7+b_8T^8+b_9T^9+b_{10}T^{10}$ были определены по результатам обработки экспериментальных измерений 59 пар значений T и U в исследованном диапазоне температур 4,2...357 К. Среднеквадратическое отклонение модели $\sigma_{\text{мод}}$ составило 60 мК.

В ряде практически важных случаев требуется повышение точности полиномиальной аппроксимации. Для этого может быть использована процедура ре-

Коэффициенты полиномиальной аппроксимации, рассчитанные методом регрессионного анализа и параметрической оптимизации

| Регрессионный анализ | | Параметрическая оптимизация | | | |
|------------------------|-------------------------|-----------------------------|------------|-----------------------------|----------|
| Коэффициенты регрессии | | Коэффициенты полинома | | Показатели степени полинома | |
| b_0 | 3,318 | U_0 | -19,65152 | — | — |
| b_1 | -0,3008 | A | -0,0309 | a | 1,0 |
| b_2 | 0,01467 | B | 8541584,25 | b | -4,49567 |
| b_3 | -0,000358 | C | -88503,671 | c | -1,20798 |
| b_4 | $5,015 \cdot 10^{-6}$ | D | 0,43966 | d | 0,64531 |
| b_5 | $-4,337 \cdot 10^{-8}$ | E | 431,53 | e | -0,58492 |
| b_6 | $2,391 \cdot 10^{-10}$ | F | -953181,3 | f | -2,13114 |
| b_7 | $-8,419 \cdot 10^{-13}$ | G | 2483831,4 | g | -2,60464 |
| b_8 | $1,831 \cdot 10^{-15}$ | H | -3958842,6 | h | -3,45349 |
| b_9 | $-2,242 \cdot 10^{-18}$ | I | 196360,52 | i | -1,68071 |
| b_{10} | $1,181 \cdot 10^{-21}$ | J | -6357072,5 | j | -4,5202 |
| σ , мК | 58,581 | σ , мК | 4,9 | — | — |

грессионного анализа для расчета коэффициентов целевой функции $U=U_0+AT^a+BT^b+CT^c+DT^d+ET^e+FT^f+GT^g+HT^h+IT^i+JT^j$, не превышающей степени регрессионного полинома, который рассматривался как базовое решение задачи, с последующей параметрической оптимизацией этих коэффициентов. Точность аппроксимации удалось повысить более чем на порядок.

Сравнительные результаты аппроксимации ТМХ указанными методами представлены в **таблице**.

Точность полученной полиномиальной аппроксимации достаточна для большинства практически востребованных задач. Она может быть повышена путем увеличения степени полинома, если в измерительной системе, где используется диодный сенсор, для сопряжения его с микроконтроллером нет ограничения на форму степенной аппроксимирующей ТМХ функции. Обычно желательно иметь аппроксимирующий полином не выше 10-го — 12-го порядка.

Нейросетевая аппроксимация

В основе работы нейросетевых алгоритмов аппроксимации экспериментальных данных положены результаты теоретических исследований А. Н. Колмогорова, В. А. Арнольда и Хехт-Нильсена. В их работах было показано, что любую функцию многих переменных можно представить (смоделировать) двухслойной нейронной сетью с прямыми связями с n нейронами входного слоя, $2n+1$ нейронами скрытого слоя, m нейронами выходного слоя и заранее заданными функциями активации f . Функции активации должны быть непрерывными и дифференцируемыми в области определения. Обычно это сигмоидальные функции, выходные значения которых монотонно меняются от 0 до 1 [5—7].

Функционирование искусственной нейронной сети имитирует работу коры головного мозга, где выработка управляющего сигнала происходит в результате параллельной обработки большого объема информации. В отличие от ЭВМ фон Неймана, производящих последовательные вычисления с огромной скоростью, нейронная сеть требует значительно меньших вычислительных ресурсов. К тому же она запоминает как правильный результат, так и ошибки, учитывая их в последующих вычислениях, и, следовательно, способна обучаться.

Для решения задачи в рамках данной работы была построена простая нейронная сеть с прямыми связями и одним скрытым слоем, архитектура которой представлена на **рис. 1**.

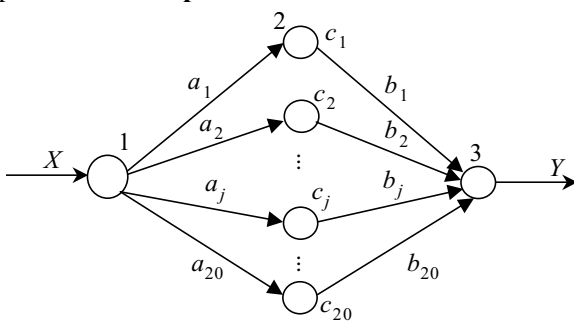


Рис. 1. Архитектура нейронной сети задачи аппроксимации термометрической характеристики диодного сенсора

Входной вектор температур X возбуждал входной нейрон 1, имеющий 20 связей через синаптические (весовые) коэффициенты связей a_j с 20 нейронами c_j скрытого слоя 2, каждый из которых обладал смещением. Выходы нейронов скрытого слоя b_j формировали выходной вектор напряжений Y выходного нейрона 3. Функция активации нейронов скрытого слоя f_1 — гиперболический тангенс, а выходного нейрона f_2 — линейная функция без смещения. Математическая модель данной нейронной сети представляется системой уравнений

$$\begin{cases} c_j = f_1(a_j X + a_j^0); \\ Y = f_2(\sum_{j=1}^{20} c_j b_j + b^0), \end{cases} \quad (1)$$

где a_j^0, b^0 — начальное смещение нейронов скрытого слоя и выходного слоя, соответственно.

Прежде чем решать поставленную задачу, нейросеть должна быть предварительно обучена, т. к. после инициализации архитектуры сети, когда ее синаптические коэффициенты являются случайными числами, аппроксимация происходит с недостаточной точностью. В процессе обучения после ввода каждого значения входного аргумента выходное значение аппроксимируемой функции корректируется в зависимости от ошибки, допущенной сетью. Сеть реагирует на это изменением значений синаптических коэффициентов, и следующее входное значение обрабатывается так, что ошибка аппроксимации стабильно снижается.

Обучающая выборка должна быть репрезентативной, т. е. достаточной для достижения поставленной цели. Такая процедура обучения называется «обучением с учителем», когда нейросети предъявляются как входные данные по аргументу X , так и выходные — по аргументу Y . В данном случае входным аргументом X являлась температура, а выходными значениями функции Y — падение напряжения на диодном сенсоре температуры.

Подбор синаптических коэффициентов обычно осуществляется одним из градиентных методов. В описываемой сети этот подбор проводили на основе процедуры регуляризации по правилу Байеса, реализованной в составе пакета прикладных программ Matlab 6.0, 7.0 со встроенным критерием останова [8]. Процесс обучения составил 300 эпох (итераций), продолжавшихся 1,5 с. Был определен 61 весовой коэффициент нейросети, обеспечивший точность аппроксимации $\sigma \approx 1,5$ мК.

Для качественного моделирования нейронной сетью необходимо, перед тем как начинать процедуру обучения, произвести предварительное нормирование входных данных. Это обуславливается тем, что функция f_1 быстро входит в область насыщения при значительных отклонениях аргумента от среднего значения по множеству входных значений. Поэтому кодирование вектора входных значений проводилось так, чтобы их элементы оказались в интервале значений $[-1; +1]$. Для этого использовалась формула преобразования:

$$\tilde{X} = \frac{2(X - X_{\min})}{X_{\max} - X_{\min}} - 1,$$

где \tilde{X} — кодированное значение элемента входного множества;
 X — значение элемента входного множества;
 X_{\min} — значение минимального элемента входного множества;
 X_{\max} — значение максимального элемента входного множества.

Множество выходных значений также нормировано, но уже самой сетью. Поэтому для восстановления переменных в натуральных показателях та же процедура была проведена и с множеством выходных значений, но теперь с целью декодирования.

Общее аппроксимационное выражение, полученное нейронной сетью, в соответствии с (1) содержит 21 слагаемое: суперпозицию 20 функций активации нейронов скрытого и выходного слоев и коэффициент начального смещения нейрона выходного слоя b^0 . Общее решение достаточно громоздко, поэтому ниже приведен фрагмент функции аппроксимации, включающий начальные и конечные слагаемые:

$$U = 0,91393 \tilde{Y} + 0,5767,$$

где $\tilde{Y} = 0,118 \cdot \text{th}(-9,5337 \tilde{X} + 10,506) + 0,0302 \times$
 $\times \text{th}(-10,198 \tilde{X} + 8,9351) - 0,01845 \cdot \text{th}(10,046 \tilde{X} - 8,0976) + \dots$
 $\dots - 6,911 \cdot \text{th}(26,127 \tilde{X} + 25,759);$

$$\tilde{X} = \frac{2(T - 4,229)}{352,887} - 1.$$

Обсуждение

Аппроксимация термометрической характеристики диодных сенсоров температуры различными способами показала, что выбор метода в значительной степени предопределяет результат. На **рис. 2** представлены экспериментальные ТМХ диодного сенсора, измеренные с точностью $\pm 0,023$ К при токе 1 мкА. На **рис. 3** приведены абсолютные отклонения ΔT экспериментально измеренной температуры от аппроксимируемого значения ТМХ, а на **рис. 4** показана зависимость среднеквадратического отклонения аппроксимации σ для ТМХ, найденные методом регрессионного анализа и нейросетевого алгоритма. Сравнительный анализ подтверждает высокую эффективность нейросетевой аппроксимации ТМХ, точность которой не менее чем в 3 раза выше точности полиномиальной аппроксимации. Достигнутая нейронной

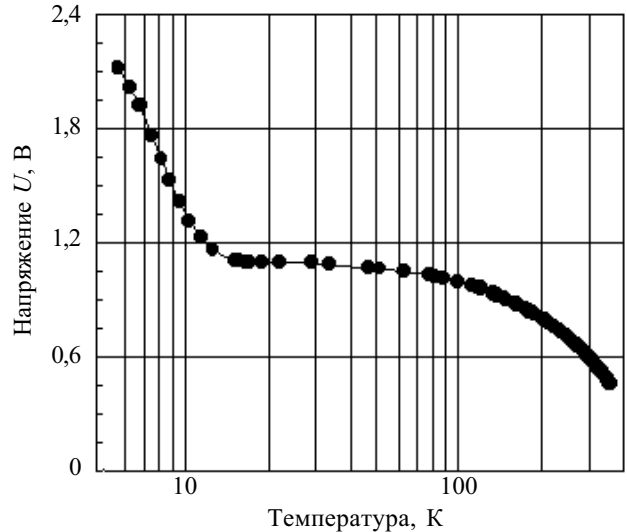


Рис. 2. Экспериментальная термометрическая характеристика диодного сенсора температуры

сетью высокая точность аппроксимации ($\approx 1,5$ мК) в исследованном диапазоне температур 4,2—357 К позволяет впервые в диодной термометрии снять (или частично снять) проблемы других методов.

В современных измерительных системах для калибровки сенсоров широко используют микроконтроллеры. Технологический прогресс в области микроэлектроники почти каждые 18 месяцев удваивает вычислительные мощности микропроцессоров и микроЭВМ, а их цена стабильно снижается. Восемьразрядные процессоры Intel 8086 используют в микроЭВМ МК51, и, хотя отсутствие аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей в их составе усложняет схемотехнику преобразования сигнала, рабочие частоты до 20 МГц и объем памяти до 20 Кбайт позволяют рассматривать их как эффективный инструмент обработки данных. С их помощью можно осуществить преобразование выходного сигнала измерительной системы, учесть ошибку измерения физической величины, произвести эффективную коррекцию сигнала во вторичном преобразователе или магистральном интерфейсе.

Основная задача, которая решается при помощи микроконтроллера, состоит в точной идентификации

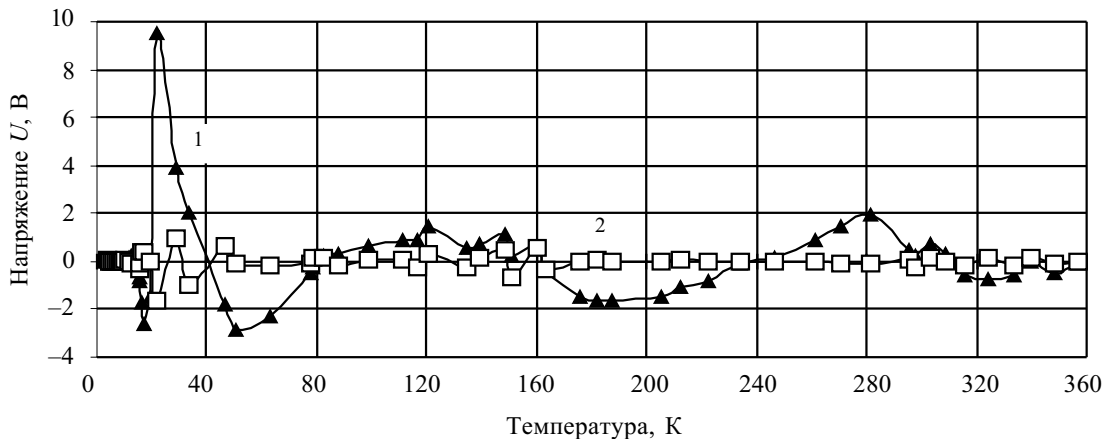


Рис. 3. Погрешность аппроксимации термометрической характеристики диодного сенсора, полученной методом регрессионного анализа (1) и нейросетевого алгоритма (2)

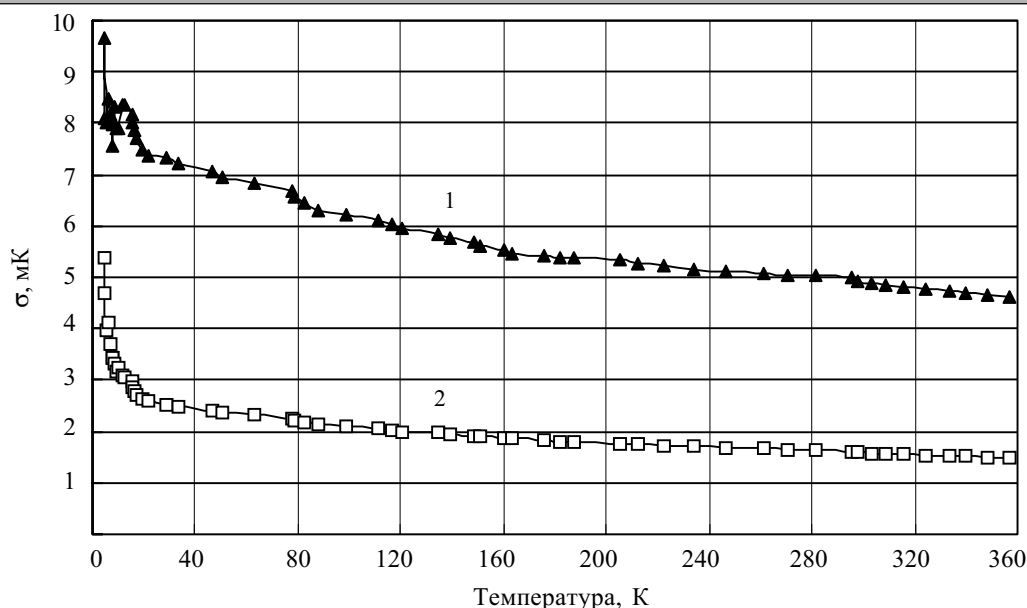


Рис. 4. Среднеквадратическое отклонение аппроксимации σ термометрической характеристики сенсора, полученной методом регрессионного анализа (1) и нейросетевого алгоритма (2)

величины измеряемого параметра в процессе его воспроизведения. Для этого в программируемое запоминающее устройство (ПЗУ) микроконтроллера заносят калибровочные данные сенсора с шагом, соответствующим разрешающей способности измерительного преобразователя. Набор этих данных является уникальным для каждого датчика и используется затем в процессе кусочно-линейной аппроксимации выходной характеристики.

В настоящее время реализация нейросети возможна по одному из трех принципиально различных вариантов, выбор которого зависит от сложности и вычислительной стоимости решаемых задач.

Первый вариант предполагает программную реализацию на универсальных ЭВМ с традиционной архитектурой фон Неймана. (Пример такой реализации рассмотрен в данной работе.)

Второй вариант предусматривает наличие периферийного компьютерного устройства, например, специальной платы ввода информации в компьютер, при помощи которой выполняют некоторые нейровычислительные операции, а основные операции нелинейного преобразования происходят в центральном процессоре ЭВМ. Как правило, аппаратная часть устройства содержит программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), в составе которых имеются блоки ввода/вывода, конфигурируемые логические блоки и сети внутренних межсоединений. Эти однокристалльные интегральные микросхемы могут быть запрограммированы или перепрограммированы для реализации нейросетевых алгоритмов решения задач с физическим распараллеливанием на уровне микрочипа. Каждый блок ввода/вывода кодируют для выполнения функций элементов связующего интерфейса с внешней системой датчиков: конфигурируемые логические блоки — для выполнения логических операций, а скоростные межсоединения — для создания коммуникативных каналов информации. Необходимые для этого коды прописываются в адрес-

ном пространстве ПЛИС. Такая перестраиваемость конфигурации позволяет ПЛИС обеспечивать оперативность и непрерывность обработки информации, придавая ей качества сопроцессора ЭВМ [9].

Третий вариант состоит в том, что технологическими средствами современной микроэлектроники все элементы нейросети, за исключением некоторых блоков, реализуются системно в виде кристалла сверхбольшой интегральной схемы — СБИС-нейрочипа. С 1990-х годов разработкой и изготовлением СБИС-нейрочипов занимаются многие ведущие фирмы промышленно развитых стран мира [10, 11]. Нейрочипы выпускаются как с жесткой, так и с гибкой структурой, когда различные нейроалгоритмы записываются в ПЗУ. Отдельный класс СБИС-нейрочипов составляют проблемно-ориентированные, предназначенные для обработки, архивирования и выделения участков изображений, анализа видеопотока, распознавания образов и т. д.

Выводы

В работе впервые представлен алгоритм нейросетевой аппроксимации для расчета термометрической характеристики кремниевых диодных сенсоров. Проведен сравнительный анализ данных, полученных при расчете термометрических характеристик нейросетевым методом и традиционным используемым полиномиальным методом аппроксимации. Обоснована необходимость использования современных аппаратных возможностей и алгоритмических методов исследований, к числу которых принадлежат процессоры и нейросетевые алгоритмы. Способность нейронных сетей обучаться позволяет восстанавливать значение измеряемого параметра, не прибегая к дорогостоящей, а иногда и просто технически невозможной процедуре проверки калибровки сенсора. Обученная на соответствующем массиве информации нейросеть может «вспомнить» всю термометрическую характеристику по нескольким реперным точкам [12].

Параллельный процесс вычислений и гибкость архитектуры делает нейросети незаменимым инструментом обработки скоростных потоков информации в системах контроля и управления, для которого разработана программная и аппаратная поддержка. Нейросетевой алгоритм обладает потенциально более высокой точностью, скоростью обработки данных, совместимостью с современными компьютерными технологиями.

Дальнейшее развитие метода будет направлено на исследование возможностей создания интеллектуальной системы контроля состояния технических систем различной природы.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Temperature measurement and control // In: Product Catalog and Reference Guide.— Westerville, OH (USA): Lake Shore Cryotronics, Inc., 2004.
2. Логвиненко С. П., Кононенко А. И., Левченко Е. П. и др. Аппроксимация в интервале 4,2÷300 К термометрических характеристик термодиодов из GaAs n-типа // Криогенная и вакуумная техника. (Харьков.)— 1973.— Вып. 3.— С. 90—93.
3. Иващенко А. Н., Шварц Ю. М. Аппроксимация термометрических характеристик кремниевых диодных сенсоров температуры // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника.— 2003.— Вып. 38.— С. 61—70.

4. Яганов П. О., Шварц Ю. М. Аппроксимация термометрической характеристики диодных сенсоров методом багатифакторного анализа // Вісник НТУУ „КПІ”. Сер. Приладобудування.— 2005.— № 30.— С. 5—11.
5. Круглов В. В., Борисов В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика.— М.: Горячая линия-Телеком, 2002.
6. Комарцова Л. Г., Максимов А. В. Нейрокомпьютеры.— М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002.
7. Назаров А. В., Лоскутов А. И. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем.— СПб: Наука и техника, 2003.
8. Медведев В. С., Потемкин В. Г. Нейронные сети. MATLAB 6 (Пакеты прикладных программ. Кн. 4).— М.: Диалог-МИФИ, 2002.
9. Борисов В. Л. Как правильно выбрать нейроускоритель? // VI Всерос. конф. «Нейрокомпьютеры и их применение».— Москва.— 2000.— С. 445—460.
10. Рогоза В. С., Ищенко А. В. Нейровычисления: состояние проблемы развития математического аппарата и аппаратного обеспечения // Электроника и связь.— 2004.— № 23.— С. 76—89.
11. Шевченко П. А., Фомин Д. В., Черников В. М., Виксне П. Е. Архитектура нейропроцессора NeuroMatrix NM 6403 // V Всерос. конф. «Нейрокомпьютеры и их применение».— Москва.— 1999.— С. 70—80.
12. Турченко В. А., Кочан В. В., Саченко А. А., Лаопулос Т. Улучшенный метод интеграции исторических данных с использованием нейронных сетей // Датчики и системы.— 2002.— № 7.— С. 35—38.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник.— М.: Техносфера, 2005.— 592 с.

Даже первичное восприятие оглавления данного справочника оставляет в памяти чрезвычайно высокий уровень упорядочения и лаконичности представленного материала. Для студентов и аспирантов — это великолепное учебное пособие по современной сенсорике; для инженеров — справочная книга, позволяющая оптимизировать технические решения на современном уровне; для исследователей — монография, изложенная профессионалом высокого уровня, стимулирующая к поиску современных методов контроля и измерений параметров технических, биологических объектов и окружающей среды с использованием новых материалов, конструкций и технологий.

Щапова И. А. Частотный англо-русский словарь по оптоэлектронике.— М.: Флинта: Наука, 2005.— 15 л.

Словарь содержит около 4500 терминов по оптоэлектронике, лазерной технике, волоконной оптике и оптическим методам обработки информации. В структуру словаря входят: частотный словарь однословных терминов, частотный словарь терминологических словосочетаний, алфавитно-частотный словарь сокращений и условных обозначений.

Для научных работников, преподавателей, аспирантов, студентов вузов — факультетов оптоэлектроники, электроники, микроэлектроники, переводчиков научно-технической литературы, а также лингвистов, интересующихся проблемами терминологии



в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

- Газоанализаторы на основе пористого карбида кремния. (Россия, г. Таганрог)
- Низкотемпературная модификация медных пленок под воздействием атомарного водорода. (Украина, г. Запорожье)
- Компьютерное моделирование проводимости композитов с хаотической структурой. (Украина, г. Одесса)
- Пьезоэлектрический ионизатор воздуха с плавной регулировкой производительности. (Украина, г. Алчевск)
- Гальваномагнитные микродатчики на базе германиевого микропровода. (Молдова, г. Кишинёв)
- Кулеры на тепловых трубах для теплонагруженных компонентов ПК. (Украина, г. Киев)
- Исследование нестабильности спектрального распределения излучения ртутных ламп. (Украина, г. Черновцы)

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

В. В. КУШНИРЕНКО, к. ф.-м. н. Г. К. НИНИДЗЕ,
к. ф.-м. н. С. П. ПАВЛЮК, Л. Д. КОНОВАЛЕНКО

Украина, Киевский национальный ун-т имени Тараса Шевченко;
Одесский национальный ун-т им. И. И. Мечникова
E-mail: pps@mail.univ.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
18.01 2005 г.

Оппонент д. ф.-м. н. А. В. ЕВТУХ
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

ИССЛЕДОВАНИЕ КРЕМНИЕВЫХ ДИФФУЗИОННЫХ РЕЗИСТОРОВ ПРИ ПРОТЕКАНИИ ИМПУЛЬСА ТОКА БОЛЬШОЙ ПЛОТНОСТИ

Определены параметры кремниевых диффузионных резисторов, необходимые для расчета их конструктивных и эксплуатационных характеристик. Предложена физическая модель, описывающая закономерности, происходящие в резисторах.

Дальнейшая миниатюризация электронной аппаратуры, несомненно, будет сопровождаться ускоренным освоением области работы ее компонентов в условиях протекания через них токов сверхбольших плотностей. В этом случае могут проявляться как новые, перспективные для дальнейшего использования эффекты, так и процессы, приводящие к деградации микроэлектронных приборов. В зарубежных публикациях преобладает информация о работах по оценке надежности полупроводниковых приборов, базирующаяся на всестороннем исследовании закономерностей развития и механизмов деградации, приводящих к отказам того или иного типа. Целью таких работ является снижение скорости и величины деградации и выявление ранних признаков (предвестников) быстрой и сильной деградации в ходе дальнейшей работы прибора. Публикаций, посвященных новым эффектам, относительно мало.

В [1, 2] подробно описаны результаты исследований кремниевых диффузионных резисторов (КДР) в стационарном режиме. Стационарные измерения дали общую картину эффектов в исследованных образцах, а импульсные — возможность предотвратить преждевременный тепловой пробой КДР, почти на порядок увеличить предельную плотность токов в них (с $J \approx 10^5$ А/см² в стационарном режиме до $J \approx 10^6$ А/см² в импульсном) и наблюдать кинетику процессов, которые в них происходят.

Как и в стационарном режиме питания [2], импульсный ток разогревал рабочий слой кремниевых резисторов, изготовленных по технологии “кремний на диэлектрической изоляции” (КНДИ) [3], до температур, при которых в них термически генерируется электронно-дырочная плазма. С увеличением тока наблюдалось возрастание скачком напряжения на резисторе и появление при этом различного рода свечения. В резисторах с определенными типоразмерами свечение наблюдалось в виде полосы [2], расположенной нормально к направлению его протекания.

Наиболее вероятно, что эти эффекты связаны с формированием в кремнии специфического домена высокого поля, так называемого термического градиентно-дрейфового (ТГД) домена [4]. Дальнейшее возрастание тока сопровождалось появлением вместо домена шнура тока и, в конце концов, катастрофическим разрушением структуры. Измерения в импульсном режиме позволили оценить времена образования ТГД-домена, шнура тока и других переходных процессов в КДР.

Цель данной работы — подробное изучение переходных процессов и характеристик в кремниевых резисторах при действии неразрушающих одиночных прямоугольных импульсов тока с плотностью до 10^6 А/см² с одновременным наблюдением свечения поверхности КДР в микроскоп.

Экспериментальные образцы и методика исследований

На рис. 1 схематически изображены исследуемые КДР — кремниевые $n^+n^-n^+$ -резисторы с электрическими контактами из алюминия (Al) к n^+ -областям. Они расположены в “карманах”, которые отделены слоем SiO₂ толщиной ≈ 2 мкм от подложки из поликремния толщиной 300 мкм. “Карманы” имеют разную глубину h_1 (от 2,8 мкм до 10,5 мкм).

Резисторы изготовлены из монокристаллического n -кремния, n^+ -области получены ионным легированием n -кремния фосфором до концентрации фосфора $P \approx 10^{21}$ см⁻³ с его дальнейшей термической разгонкой на глубину $h \approx 5$ мкм. В зависимости от глубины h_1 “кармана” n^+ -область имеет такую же глубину, как и “карман” ($h_1/h=1$), или меньшую ($h_1/h>1$).

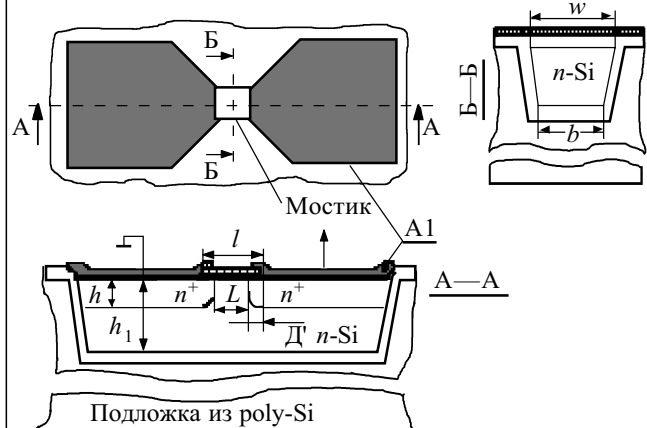


Рис. 1. Схематическое изображение исследуемых КДР (сечение по Б—Б для наглядности увеличено)

Считается, что ток в КДР в первую очередь разогревает ту его часть из n -кремния, которая расположена между n^+ -областями и которую дальше будем называть “мостиком”. Ясно, что омическое сопротивление “мостика” зависит от его размеров h_1 , L , b и w (см. рис. 1) и, в основном, определяет сопротивление КДР R . В исследованных резисторах величина R лежала в интервале от единиц до десятков Ом.

КДР отличались между собой главным образом двумя конструктивными параметрами. Первый — это величины h_1 и h , которые в разных образцах были разные, но для которых всегда выполнялось соотношение $h_1/h=1$ или $h_1/h>1$; второй — так называемая фотолитографическая длина “мостика” l . В разных образцах $l=8,0...13,4$ мкм. Заметим, что при разгонке фосфор “подлегирует” кремний под краем окисла возле поверхности [5], вследствие чего длина “мостика” L между n^+ -областями всегда меньше l на длину “подлегирувания” $2\Delta l$.

Поперечное сечение “мостика” имеет вид трапеции, у которой размер нижней основы $b=4,0$ мкм фиксированный, а величина верхней основы w определяется глубиной “кармана” h_1 и изменяется в интервале $w=8...18$ мкм. В структурах разных типов размеры контактных площадок из Al немного отличались, но в среднем их длина составляла 200 мкм, а ширина — 150 мкм.

Импульсные вольт-амперные характеристики (ВАХ) КДР снимали в режиме генератора тока. Одновременно с электрическими измерениями поверхность КДР наблюдали в оптический микроскоп.

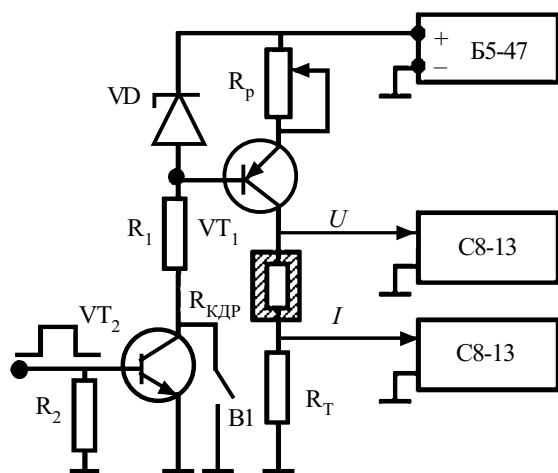


Рис. 2. Схема измерений

Схема измерений показана на рис. 2. Генератор тока собран на транзисторе VT1 по стандартной схеме и работает следующим образом. Транзистор VT1 стабилизирует ток I , протекающий через КДР. Резистор R_p задает этот ток. С R_T снимается сигнал, пропорциональный току I , при этом выполняется условие $R_T \ll R_{KDR}$. Резистор R_1 , VD стабилизируют рабочую точку транзистора VT1. Транзистор VT2 обеспечивает включение генератора тока в импульсном режиме. При замыкании переключателя B1 генератор тока начинает работать в стационарном режиме.

Обсуждение результатов

Осциллограммы падения напряжения $V(t)$ на КДР и их ВАХ.

При измерениях импульсных ВАХ КДР питали одиночными прямоугольными импульсами тока I и регистрировали изменение на них напряжения $V(t)$ во времени t . На рис. 3 приведены типичные осциллограммы $V(t)$ при разных I . Они характерны для всех КДР (далее — группа 1, рис. 3, а), кроме КДР с наибольшими значениями глубины $h_1=10,5$ мкм ($h_1/h=2,1$) и длины $l=l_{max}=13,4$ мкм (далее — группа 2, рис. 3, б).

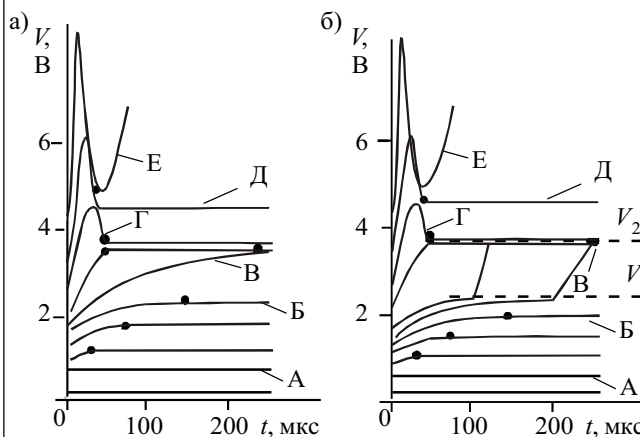


Рис. 3. Осциллограммы напряжения $V(t)$ при разных значениях тока $I(t)$, полученные для разных групп образцов: а — группа 1; б — группа 2

Общими свойствами всех КДР являются:

1. Прямоугольная форма импульсов напряжения $V(t)$ при небольших токах I (осц. А на рис. 3, а, б).
2. Появление переходных участков на зависимостях $V(t)$ при больших токах I (после осц. А на рис. 3, а, б) и выход $V(t)$ со временем на отмеченные точки (•) значения $V_{ст}$, которые совпадают со стационарными значениями. Отметим, что сами переходные участки $V(t)$ ведут себя по-разному в КДР из 1-й и 2-й групп.

Для КДР группы 1 характерно наличие пороговой величины тока, небольшое превышение которой приводит к росту $V(t)$ на структуре (сравни осц. Б и В на рис. 3, а) и, одновременно, к возникновению в ней светящейся поперечной к направлению тока полосы (схематически изображена на рис. 4, Г). Увеличение I приводит к появлению пика на осц. $V(t)$ и в конце концов завершается образованием токового шнура между n^+ -областями и разрушением КДР.

У КДР группы 2 также существует пороговая величина тока, небольшое превышение которой вызывает значительный скачок $V(t)$ с величины V_1 до V_2 в течение действия одного импульса тока (осц. В, рис. 3, б). С ростом I этот скачок сдвигается к началу импульса, причем его длительность уменьшается, а величины V_1 и V_2 не меняются. Отметим, что скачку V на КДР сопутствует появление в структуре двух светящихся пятен, расположенных посередине n -области у ее боковых сторон (рис. 4, Г'). Дальнейший рост тока, как и в первом случае, сопровождается появлением пика на

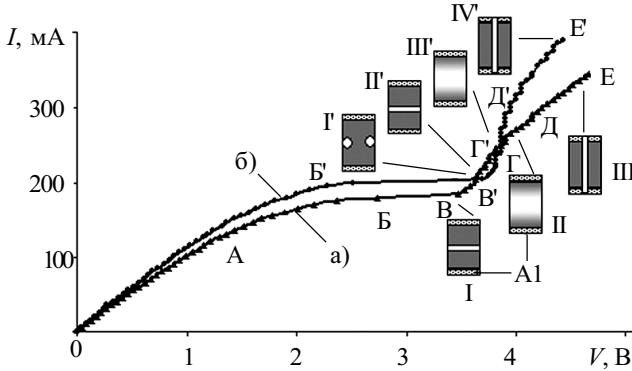


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики резисторов (рядом с ВАХ — распределение излучения с резистора по его поверхности):
а — группа 1; б — группа 2

зависимостях $V(t)$ (смотри, например, осц. Г, Д на рис. 3, а, б), образованием токового шнура и разрушением КДР (осц. Е на рис. 3, а, б).

Импульсные ВАХ КДР показаны на рис. 4. Сопоставим форму осциллограмм напряжения на разных участках ВАХ. Участок 0А обеих ВАХ (рис. 4, а, б) соответствует прямоугольной форме импульсов $V(t)$ (осц. А, рис. 3, а, б), участок АБ — нарастанию напряжения с течением времени после начала импульса и выхода на стационарное значение (осц. Б, рис. 3, а, б). На этом участке, как и на 0А, наблюдалось почти пропорциональное возрастание напряжения с увеличением тока. После достижения некоего значения тока (точка Б на рис. 4, а и осц. Б, рис. 3, а) дальнейшее небольшое его возрастание приводило к увеличению (прыжком) напряжения на КДР (смотри осц. В, рис. 3, а и участок БВ, рис. 4, а) и сокращению после этого почти до нуля времени переходного процесса с возрастанием величины I .

Дальнейшее увеличение тока I сопровождалось появлением в начале осциллограммы $V(t)$ пика (осц. Г, рис. 3, а). Падение напряжения на КДР при дальнейшем увеличении I начинало возрастать пропорционально току (осц. Д на рис. 3, а и участок ГДЕ, рис. 4, а). В конце концов, после начального пика (осц. Е, рис. 3, а) напряжение на КДР резко возрастало и структура разрушалась.

Подобный сценарий изменения $V(t)$ во времени при разных I характерен для всех КДР — за исключением тех, в которых $h_1 = h_{1\max}$ и $l = l_{\max}$ (группа 2). Заметим, что при измерениях стационарных ВАХ именно на этих КДР наблюдались ВАХ с отрицательной дифференциальной проводимостью, что существенно выделяет их среди всех других. Характерным отличием, как уже было сказано, является наличие пороговой величины тока, превышение которой вызывает значительный скачок напряжения $V(t)$ (осц. В, рис. 3, б и участок Б'В', ВАХ рис. 4, б), и сокращение почти до нуля времени переходного процесса с возрастанием величины I . Такое ускорение переходного процесса происходило при одинаковом стационарном значении V_1 и V_2 . Дальнейшее увеличение тока I сопровождалось появлением в начале осциллограммы $V(t)$ пика (осц. Г, рис. 3, б).

Величина напряжения после выхода на стационарное значение изменялась ступеньками: в некотором диапазоне токов напряжение V не менялось, затем, при увеличении I , падение напряжения скачком возросло и вновь стабилизировалось, и т. д. Таких участков стабильного напряжения могло быть несколько (участок В'Д', рис. 4, б). На ВАХ они расположены в диапазоне токов $220 \text{ mA} < I < 330 \text{ mA}$. На этих участках дифференциальное сопротивление резисторов периодически осциллировало от нуля до расчетной величины. При дальнейшем увеличении тока ($I > 330 \text{ mA}$) падение напряжения возрастало пропорционально I (участок Д'Е', рис. 4, б). На всех других участках характер ВАХ для обеих групп структур совпадает.

Определение длины “мостика” КДР.

Выше отмечалось, что вследствие “подлегиrowания” действительная длина “мостика” L меньше его фотолитографической длины l . Но именно величина L определяет электрические параметры КДР, например, крутизну начального участка ВАХ. Поэтому прежде всего мы определили величину L в разных КДР, для чего воспользовались стандартной методикой [5]. В соответствии с ней сначала находят глубину “подлегиrowания” Δl , а после этого — L . В нашем случае длину Δl можно найти из сравнения характеристик двух образцов с $h_1/h \approx 1$ и разными значениями l_1 и l_2 , именно которые и определяют различие в сопротивлениях этих образцов R_1 и R_2 .

Чтобы найти Δl , запишем соотношение

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{L_1}{L_2} = \frac{l_1 - 2\Delta l}{l_2 - 2\Delta l}, \tag{1}$$

где R_1, R_2 — сопротивления первого и второго КДР;
 L_1, L_2 — действительная длина “мостиков” в этих КДР;
 l_1, l_2 — фотолитографические длины “мостиков”;
 Δl — глубина “подлегиrowания” под границу окисла, которая одинакова во всех КДР.

Решение (1) относительно Δl дает:

$$\Delta l = \frac{R_1 l_2 - R_2 l_1}{2(R_2 - R_1)}. \tag{2}$$

Для нахождения величины Δl использованы КДР с $h_1/h \approx 1$, в которых $h = 4,9 \text{ мкм}$, $l_1 = 13,4 \text{ мкм}$, $l_2 = 11,2 \text{ мкм}$. Определенные из начальных участков ВАХ этих КДР сопротивления равны: $R_1 \approx 15 \text{ Ом}$, $R_2 \approx 11 \text{ Ом}$. Подстановкой в (2) значений l_1, l_2, R_1 и R_2 нашли, что $\Delta l = 2,8 \text{ мкм}$, а длины “мостиков” в разных структурах составляют 2,4, 5,6 и 8,0 мкм.

Определение концентрации электронов в n-кремнии.

Знание длины l дало возможность определить концентрацию электронов в n -области “мостика”. Необходимость такого определения вызвана двумя причинами. Во-первых, при изготовлении КДР применяют высокотемпературные процессы, вследствие чего исходная и конечная концентрации свободных электронов в “мостике” могут отличаться. Во-вторых, нам не была точно известна исходная концентрация электронов в n -кремнии. Поэтому в исследуемых КДР величину концентрации n определяли следующим образом.

Сопротивление R “мостиков” на начальных (линейных) участках ВАХ, где выполняется закон Ома, определяется как

$$R = U/I. \quad (3)$$

С другой стороны, его можно выразить через удельное сопротивление ρ n -кремния и параметры “мостика” в виде

$$R = \rho \frac{2l}{(w+b)h_1}, \quad (4)$$

где

$$\rho = 1/en\mu; \quad (5)$$

e — заряд электрона;

n, μ — концентрация и подвижность электронов.

Комбинируя выражения (3)—(5), легко показать, что

$$n = \frac{2LI}{eh_1(w+b)\mu V}. \quad (6)$$

Взяв на линейных участках ВАХ значения I и V и считая, что подвижность электронов μ в n -кремнии равняется своему объемному значению, нашли, что в “мостике” $n \approx 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Протекание тока в КДР и связанные с ним процессы.

Начальный линейный участок ВАХ КДР (рис. 4, б) свидетельствует о соблюдении на нем закона Ома. Переход от линейного к сублинейному участку на ВАХ с возрастанием тока начинается, когда напряженность электрического поля E в кремнии превышает значение $E \approx 3 \cdot 10^3 \text{ В/см}$. Это значение почти совпадает с величиной $E \approx 5 \cdot 10^3 \text{ В/см}$, при котором скорость электронов в кремнии начинает стремиться к насыщению [6, с. 54]. Поэтому сублинейный ход ВАХ можно связать именно с насыщением скорости электронов.

При дальнейшем увеличении тока наблюдается прыжок напряжения, который определяет участок БВ на ВАХ (см. рис. 4, а и осц. В, рис. 3, а). Этот прыжок, следует думать, вызван образованием области высокого поля. Возможно, что это так называемый ТГД-домен [4], т. к. в исследованных образцах выполняются необходимые для его образования требования.

Именно с процессом образования такого домена можно связать постепенное увеличение напряжения на КДР после начала действия импульса тока I (осц. В, рис. 3, а). Ясно, что время образования ТГД-домена должно уменьшаться с возрастанием величины тока, которое наблюдается в эксперименте (осц. В, Г, рис. 3, а).

После образования домен существует до окончания импульса тока. Сильное поле в домене “разогревает” электроны и дырки, рекомбинация которых сопровождается излучением в видимом участке спектра. При дальнейшем увеличении тока I ТГД-домен сначала образуется, но из-за перегрева структуры потом разрушается. Причины его разрушения описаны в [7].

Выводы

Проведенные исследования характеристик кремниевых диффузионных резисторов, созданных по технологии “кремний на диэлектрической изоляции”, при протекании сквозь них токов экстремально большой плотности, вплоть до их разрушения, позволили:

- обнаружить участки ВАХ, где проявляются осцилляции дифференциального сопротивления;
- определить параметры кремниевых диффузионных резисторов, необходимые для расчета их эксплуатационных характеристик;
- определить глубину подлегирования, необходимую для определения длины резистора, и концентрацию носителей заряда в нем.

Наблюдаемые эффекты объяснены возникновением термического градиентно-дрейфового домена при больших плотностях тока, протекающего через резистор.

Полученные экспериментальные результаты могут быть использованы специалистами, работающими в области проектирования и конструирования электронных средств и занимающимися материалами микроэлектроники.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Коноваленко Л. Д., Макордей Ф. В., Мазуренко В. С., Андреев В. И. Полупроводниковые энерговыделяющие элементы // Фотоэлектроника.— 2003.— Вып. 12.— С. 21—27.
2. Коноваленко Л. Д., Кушніренко В. В., Нінідзе Г. К., Павлюк С. П. Фізичні ефекти в кремнієвих дифузійних резисторах при протіканні великих струмів // Вісник КНУ. Сер. Ф-МН.— 2004.— № 1.— С. 325—334.
3. Колобов Н. А. Основы технологии электронных приборов.— М.: Высшая школа, 1980.
4. Добровольський В. М., Павлюк С. П. Термічний градієнтно-дрейфовий домен в електронно-дірковій плазмі напівпровідників // ФТН.— 1981.— Т. 15, вип. 1.— С. 120—129.
5. Интегральные схемы на МДП-приборах.— М.: Мир, 1975.
6. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 1.— М.: Мир, 1984.
7. Павлюк С. П. Механізм переміщення та зникнення термічного градієнтно-дрейфового домену в напівпровідниках // Вісник КНУ. Сер. Ф-МН.— 2001.— № 1.— С. 400—401.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Игуменов Д. В., Костюнина Г. П. Основы полупроводниковой электроники. Учебное пособие.— М.: Горячая линия-Телеком, 2005.— 392 с., ил.

В книге изложены основы построения современных полупроводниковых аналоговых и цифровых устройств. Приведены сведения о физических явлениях в полупроводниковых элементах, рассмотрены различные диоды, биполярные и полевые транзисторы. Описаны особенности интегральных схем. Основное внимание уделяется рассмотрению разнообразных транзисторных и интегральных устройств непрерывного и импульсного действия.

Для студентов вузов; будет полезна специалистам смежных с электроникой областей, которые занимаются вопросами, требующими от них дополнительных знаний по электронике.



К. ф.-м. н. Д. М. ЁДГОРОВА, д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ

Узбекистан, г. Ташкент, НПО «Физика-Солнце»
E-mail: karimov@physic.uzsci.net

Дата поступления в редакцию
04.07 2005 г.

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХБАРЬЕРНЫХ ФОТОДИОДНЫХ СТРУКТУР С МЕТАЛЛОПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ

Результаты могут быть использованы для оценки частотного диапазона, зависимости фоточувствительности от поля, выявления механизмов фоточувствительности двухбарьерных структур с металлополупроводниковыми переходами.

Фотодиодные структуры, основанные на выпрямляющем контакте "металл—полупроводник—металл", обладая внутренним фотоэлектрическим усилением, привлекают все большее внимание исследователей [1, 2]. Они представляют собой два встречно- или обратновключенных Шоттки барьерных контакта к активной области *n*- или *p*-типа. При подаче на них напряжения в любом из направлений формируется зависимость обратного тока от запирающего напряжения для одного из выпрямляющих барьеров, поскольку другой барьер оказывается включенным в прямом направлении. Процессы токообразования в двухбарьерных структурах, включенных последовательно с противоположной полярностью типа диодов Шоттки "металл—полупроводник", рассмотрены в работах [3, 4]. Однако характеристики обратновстречноключенных переходов остаются неизученными.

В единую структуру с общей базовой областью может быть также интегрирован *p-n*-переход и переход "металл—полупроводник" [5, 6]. В результате получится *m-p-n*- или *p-n-m*-структура. В этих структурах также имеем обратно- или прямовключенные переходы, один из которых полупроводниковый, а другой металлополупроводниковый.

Вольт-амперные характеристики формируются из обратной ветви *p-n*-перехода и перехода "металл—полупроводник". В рабочем режиме по мере изменения приложенного напряжения они перераспределяются между обратновключенными барьерами. В работе [4] рассмотрено формирование токовых характеристик для двух последовательно включенных с противоположной полярностью диодов Шоттки "металл—полупроводник".

Пренебрегая последовательным сопротивлением и приравняв токи I_1 и I_2 через два диода току через переход I и полагая полное падение напряжения на переходе равным сумме V_1 и V_2 — напряжений, падающих на *m-p*- и *p-n*-переходах,

$$V_{\text{общ}} = V_1 + V_2, \quad (1)$$

получим выражение для описания вольт-амперной характеристики двухбарьерного диода:

$$I = \frac{2I_{s1}I_{s2} \operatorname{sh}(qV/2kT)}{I_{s1} \exp(qV/2kT) + I_{s2} \exp(qV/2nT)}, \quad (2)$$

где I_{s1}, I_{s2} — токи насыщения для одной и другой ветвей;
 q — заряд электрона;
 V — приложенное напряжение;
 k — постоянная Больцмана;
 T — температура;
 n — безразмерный коэффициент показателя степени.

При этом

$$V_2 = V_{\text{общ}} - V_1. \quad (3)$$

Воспользовавшись диаграммой сложения прямой и обратной ветвей вольт-амперных характеристик (рис. 1 [4, с. 129—133]) и выдвинутыми положениями, можно определить перераспределение потенциала между двумя обратновключенными переходами.

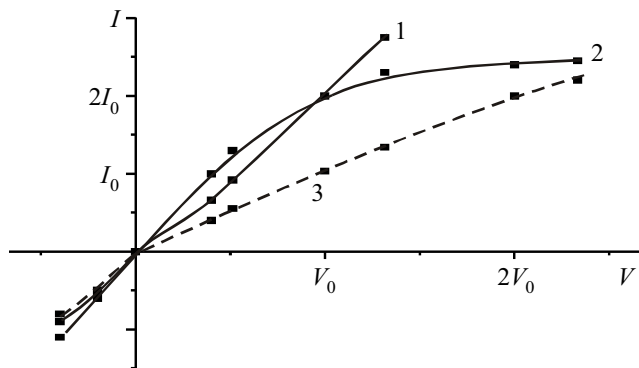


Рис. 1. Схематическая диаграмма вклада двух диодов Шоттки в вольт-амперную характеристику

Так, суммирование прямой и обратной ветвей вольт-амперных характеристик осуществляется в соответствии с рис. 1. Из рисунка видно, что отдельно прямая (1) и обратная (2) ветви в едином графике пересекаются при напряжении V_0 , однако при их последовательном соединении ток за счет увеличения общего сопротивления уменьшится, и результирующая кривая пройдет по пунктирной 3. При этом отношение прилагаемого напряжения к протекающему току даст значение измеряемого общего сопротивления, равного сумме R_1 и R_2 — сопротивлений *m-p*- и *p-n*-переходов, —

$$R_{\text{общ}} = R_1 + R_2, \quad (4)$$

а сопротивление отдельно взятого перехода составит, соответственно,

$$R_2 = R_{\text{общ}} - R_1. \quad (5)$$

Таким образом, вольт-амперная характеристика исследуемой двухбарьерной структуры до точки перегиба определяется прямо- и обратновключенными переходами, а дальнейший ход — лишь обратновключенным переходом. Следует отметить, что независимо от симметричности (совпадения прямой и обратной ветвей) или несимметричности (различия в режиме прямого и обратного направлений) вольт-амперных характеристик именно в точке перегиба данной кривой $R^{\text{пр}} = R^{\text{обр}} = R_{\text{общ}} = R_1 + R_2$. Причем в случае несимметричной структуры будем иметь точки перегиба с разными значениями.

Поскольку для конкретной ветви мы измеряем ток, протекающий через последовательно соединенные два перехода, то в случае одиночного перехода ток был бы в два раза больше $2I_0$, а сопротивление в два раза меньше —

$$R_0 = V_0 / I_0, \quad (6)$$

где V_0 и I_0 — напряжение и ток в точке перегиба вольт-амперной характеристики.

В результате имеем для отдельного перехода

$$R_1 = R_0 / 2. \quad (7)$$

Токи, протекающие через оба перехода, равны [4]

$$I_1 = I_2; \quad (8)$$

$$V_1 R_2 = R_1 V_2. \quad (8)$$

Воспользовавшись равенством токов и выражая сопротивление переходов через экспериментальные значения токов, подставляя выражения (2), (4) и (6) в формулу (8), находим выражение для напряжения, падающего на первом переходе:

$$V_1 = \frac{I_{\text{общ}} V_0}{2 I_0}. \quad (10)$$

Таким образом, для каждой точки, подставляя данные значения тока в формулу (10), получим значения напряжений, падающих на первом переходе. Затем на основе полученных данных с помощью формулы (3) находим значения напряжений, падающих на втором переходе. Здесь отметим, что особенность структуры с симметричной вольт-амперной характеристикой заключается в том, что найденные значения напряжений, падающих на каждом переходе при смене полярности напряжения, будут иметь те же значения, т. е. в обоих направлениях будем иметь V_1 и V_2 .

Знание величин напряжений, падающих на конкретных обратновключенных барьерах, позволило бы получить представление о механизмах фоточувствительности, энергетической зонной диаграмме и других физических параметрах.

Целью настоящей работы является получение данных для оценки частотного диапазона, зависимости фоточувствительности от поля и выявление механизмов фоточувствительности двухбарьерных $m-p\text{GaAs}-n\text{GdS}$ - и модернизированных $m-p\text{GaAs}-p\text{GaAs}-n\text{GdS}$ -структур с металлополупроводниковыми переходами на основе экспериментальных данных вольт-амперной характеристики.

Оценка перераспределения напряжений на обратновключенных симметричных двухбарьерных $m-p\text{GaAs}-n\text{GdS}$ -структурах

Исследуемые образцы $m_1-p\text{GaAs}-n\text{GdS}$ -структур изготовлены на основе монокристаллического арсенида галлия p -типа проводимости с концентрацией носителей $N_p = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и толщиной 400 мкм. Гетерослой $n\text{GdS}$ получен поверх $p\text{GaAs}$ путем вакуумного напыления из кристаллов сульфида кадмия. Концентрация носителей в напыленном слое $n\text{GdS}$ равна $N_n = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при толщине 0,2 мкм. Металлический барьер к $p\text{GaAs}$ сформирован напылением Ag ($\approx 70 \text{ \AA}$), высота потенциального барьера $\phi = 0,62 \text{ эВ}$ [5, с. 303—305].

Геометрическая модель $m-p\text{GaAs}-n\text{CdS}$ -структуры представляет собой $p-n$ -переход, состыкованный с обратновключенным барьером Шоттки. Между металлом и полупроводником со стороны $p\text{GaAs}$ имеется область объемного заряда выпрямляющего перехода с сопротивлением $R = nkT/qI_0$ [4], что намного больше сопротивления базовой области (0,3 Ом·см).

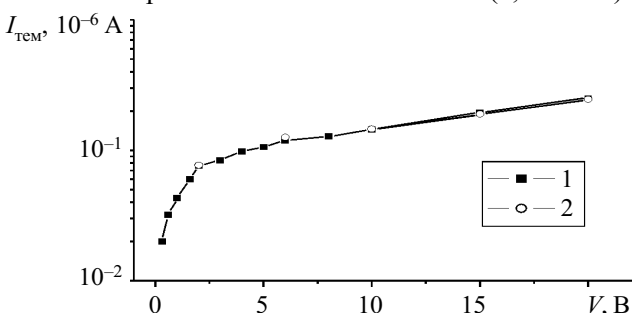


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика $m-p\text{GaAs}-n\text{GdS}$ -структуры ($I_{\text{тем}}$ — темновой ток)

Эквивалентную электрическую схему исследуемой $m-p-n$ -структуры представим в виде двух последовательно соединенных сопротивлений, подключенных к источнику напряжения. Его вольт-амперная характеристика является настолько симметричной, что в режиме прямого и обратного смещения обе кривые ложатся друг на друга (рис. 2). Поэтому расчет будем проводить для одной кривой, поскольку

$$R^{p-n} = R^{m-p} = R_{\text{общ}} = R_1 + R_2.$$

Примем напряжение в точке перегиба $V_0 = 2 \text{ В}$, а ток $I_0 = 0,076 \text{ мкА}$, причем эти значения являются единственными. Определенные с помощью формул (10) и (3) значения падающих напряжений сведены в табл. 1. Из таблицы видно, что в запираемом переходе R_1^{m-p} величина

Таблица 1

Перераспределение потенциала между переходами в $m-p\text{GaAs}-n\text{GdS}$ -структуре

| $V_{\text{общ}}^{m-p-n}$, В | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $I_{\text{общ}}^{m-p-n}$, мкА | 0,076 | 0,084 | 0,098 | 0,106 | 0,119 | 0,128 | 0,144 |
| V_1^{m-p} , В | 0,99 | 1,1 | 1,28 | 1,39 | 1,56 | 1,68 | 1,89 |
| V_2^{p-n} , В | 1,01 | 1,9 | 2,72 | 3,61 | 4,44 | 6,32 | 8,11 |

падающего напряжения V_2^{p-n} возрастает, а в прямо-смещаемом $p-n$ -переходе падающее напряжение медленно увеличивается. Наблюдаемую зависимость можно объяснить сменой хода роста обратного тока при напряжениях, больших $V_{\text{общ}} = 6$ В, когда выходное динамическое сопротивление меняет знак и насыщающийся характер роста обратного тока сменяется его последовательным ростом.

Анализ полевых эффектов в запирающем переходе несимметричных двухбарьерных $m-p\text{GaAs}-p\text{GaAs}-n\text{GdS}$ -структур

На примере вышерассмотренной гетеропары $p\text{GaAs}-n\text{GdS}$ были изготовлены несимметричные двухбарьерные модифицированные $m-p\text{GaAs}-p\text{GaAs}-n\text{GdS}$ -структуры, т. е. с промежуточным эпитаксиальным слоем $p\text{GaAs}$. Изотипный $p\text{GaAs}-p\text{GaAs}$ -переход получен выращиванием из жидкой фазы эпитаксиального слоя арсенида галлия с концентрацией носителей $\approx 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ на подложке $p\text{GaAs}$ с концентрацией носителей $N_p = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Гетерослой $n\text{GdS}$ получен поверх эпитаксиального слоя $p\text{GaAs}$ путем вакуумного напыления из кристаллов сульфида кадмия. Концентрация носителей в напыленном слое $n\text{GdS}$ равна $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при толщине 0,2 мкм. Металлический барьер к $p\text{GaAs}$ сформирован напылением Ag (см. рис. 3).

В данной структуре, как и в $m-p\text{GaAs}-n\text{GdS}$ -структуре, имеем два обратновключенных $m-p\text{GaAs}$ - и гетеро- $p\text{GaAs}-n\text{GdS}$ -перехода. Как видно из рис. 4, в режиме прямого смещения (кривая 1) ток запираемого перехода $m-p\text{GaAs}$ больше, чем при обратном смещении гетероперехода (кривая 2).

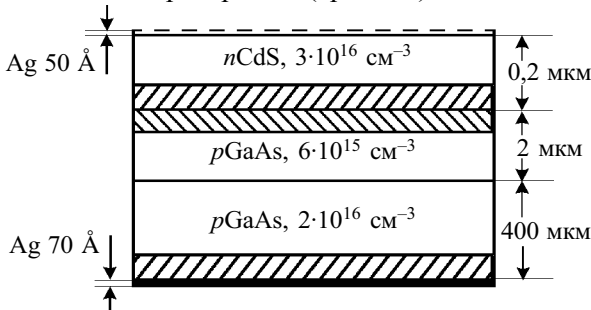


Рис. 3. Геометрическая конструкция исследуемой $m-p\text{GaAs}-p\text{GaAs}-n\text{GdS}$ -структуры

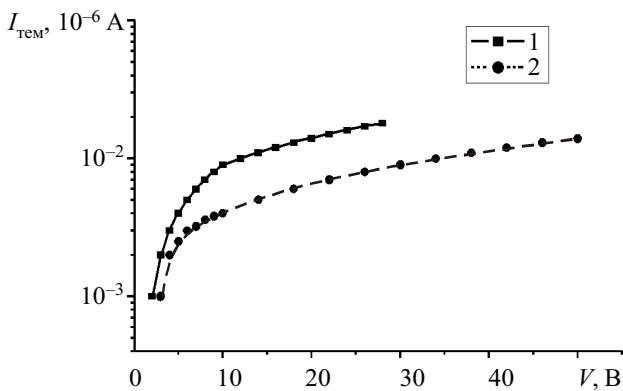


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика двухбарьерной $m-p\text{GaAs}-p\text{GaAs}-n\text{GdS}$ -структуры в режиме прямого включения (1) и обратного (2)

Здесь отметим, что введение промежуточного эпитаксиального слоя $p\text{GaAs}$ позволило уменьшить обратные токи гетероперехода. Если обратимся к вольт-амперной характеристике $m-p\text{GaAs}-p\text{GaAs}-n\text{GdS}$ -структуры, то в случае прямого смещения гетероперехода сопротивление цепи оказывается меньше, т. е. сопротивление перехода "металл—полупроводник" $R^{\text{обп}}$ меньше, чем гетероперехода $R^{\text{пп}}$, и, соответственно, $R^{\text{пп}} \neq R^{\text{обп}}$. При оценке перераспределения напряжения между переходами для каждой ветви вольт-амперной характеристики будем иметь свои данные, свои точки перегиба.

Для режима прямого смещения гетероперехода для несимметричной структуры будем иметь следующие формулы.

Напряжение, прилагаемое извне,

$$V_{\text{пр}}^{m-p-n} = V_1^{p-n} + V_2^{m-p}, \quad (11)$$

откуда

$$V_2^{m-p} = V_{\text{пр}}^{m-p-n} - V_1^{p-n}. \quad (12)$$

В результате падение напряжения в прямосмещаемом переходе будет определяться из выражения

$$V_1^{p-n} = \frac{I_{\text{пр}}^{m-p-n} V_0^{p-n}}{2I_0^{p-n}}. \quad (13)$$

Для ветви с прямосмещаемым гетеропереходом (обратно смещаемым переходом "металл—полупроводник") точка перегиба соответствует $V_0^{p-n} = 10$ В и $I_0^{p-n} = 0,009$ мкА. Подставляя эти значения в формулы (13) и (12), получим данные напряжений для одной ветви, которые приведены в табл. 2. Учитывая, что все процессы в данном режиме будут определяться запираемым переходом "металл—полупроводник", вычисления толщины слоя объемного заряда и поля проведем для запираемого барьера.

Для запираемого перехода "металл—полупроводник" для полученных напряжений V_2^{m-p} вычислим тол-

Таблица 2

Значения напряжений, падающих на переходах, и напряженностей поля E в режиме прямого смещения гетероперехода

| $V_{\text{пр}}^{m-p-n}$, В | $I_{\text{пр}}^{m-p-n}$, мкА | V_1^{p-n} , В | V_2^{m-p} , В | W_2^{m-p} , 10^{-5} см | E_2^{m-p} , 10^{-5} В/см |
|-----------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|----------------------------|------------------------------|
| 2 | 0,001 | 0,55 | 1,45 | 3,54 | 0,41 |
| 3 | 0,002 | 1,11 | 1,89 | 3,9 | 0,48 |
| 4 | 0,003 | 1,66 | 2,34 | 4,24 | 0,55 |
| 5 | 0,004 | 2,22 | 2,78 | 4,54 | 0,61 |
| 6 | 0,005 | 2,77 | 3,23 | 4,83 | 0,66 |
| 7 | 0,006 | 3,33 | 3,67 | 5,1 | 0,72 |
| 8 | 0,007 | 3,88 | 4,12 | 5,36 | 0,76 |
| 9 | 0,008 | 4,44 | 4,56 | 5,61 | 0,81 |
| 10 | 0,009 | 4,99 | 5,01 | 5,84 | 0,85 |
| 14 | 0,011 | 6,11 | 5,75 | 6,22 | 0,92 |
| 18 | 0,013 | 7,22 | 10,78 | 8,32 | 1,29 |
| 22 | 0,015 | 8,33 | 13,67 | 9,31 | 1,46 |
| 24 | 0,016 | 8,88 | 15,12 | 9,78 | 1,54 |
| 26 | 0,017 | 9,44 | 16,56 | 10,21 | 1,62 |
| 28 | 0,018 | 9,99 | 18 | 10,63 | 1,69 |

щину слоя объемного заряда с помощью формулы [5, с. 260—262]

$$W_2^{m-p} = \left(\frac{2\epsilon\epsilon_0 (\varphi + V_2^{m-p})}{q N_p} \right)^{1/2}, \quad (14)$$

где $\epsilon\epsilon_0$ — диэлектрическая проницаемость полупроводника и вакуума, соответственно.

В режиме обратного смещения гетероперехода общее напряжение представляет собой

$$V_{обр}^{m-p-n} = V_1^{m-p} + V_2^{p-n}, \quad (15)$$

где

$$V_2^{p-n} = V_{обр}^{m-p-n} - V_1^{m-p}. \quad (16)$$

Для напряжения, падающего в прямосмещаемом переходе "металл—полупроводник", имеем:

$$V_1^{m-p} = \frac{I_{обр}^{m-p-n} V_0^{m-p}}{2I_0^{m-p}}. \quad (17)$$

Для ветви с прямосмещаемым переходом "металл—полупроводник" (обратносмещаемым гетеропереходом) выберем значения $V_0^{m-p} = 4$ В, $I_0^{m-p} = 0,002$ мкА. Подставляя эти значения в формулу (17), получим значения напряжений для другой ветви, которые сведены в табл. 3.

Таблица 3

Напряжения, падающие на переходах в режиме обратного смещения гетероперехода

| $V_{обр}^{m-p-n}$, В | $I_{обр}^{m-p-n}$, мкА | V_1^{m-p} , В | V_2^{p-n} , В | W_1^{m-p} , 10^{-5} см | E_1^{m-p} , 10^{-5} В/см | W_2^{p-n} , 10^{-5} см | E_2^{p-n} , 10^{-5} В/см |
|-----------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 3 | 0,001 | 1 | 2 | 3,68 | 0,27 | 13,9 | 0,14 |
| 4 | 0,002 | 2 | 2 | 3,98 | 0,5 | 13,9 | 0,14 |
| 6 | 0,003 | 3 | 3 | 4,69 | 0,64 | 16,05 | 0,187 |
| 9 | 0,004 | 4 | 5 | 5,64 | 0,71 | 19,66 | 0,25 |
| 14 | 0,005 | 5 | 9 | 6,15 | 0,81 | 25,38 | 0,35 |
| 18 | 0,006 | 6 | 12 | 6,34 | 0,946 | 28,94 | 0,414 |
| 22 | 0,007 | 7 | 15 | 6,8 | 1,03 | 32,11 | 0,467 |
| 26 | 0,008 | 8 | 18 | 7,23 | 1,1 | 34,99 | 0,51 |
| 30 | 0,009 | 9 | 21 | 7,64 | 1,178 | 37,65 | 0,557 |
| 34 | 0,01 | 10 | 24 | 8,03 | 1,24 | 40,14 | 0,59 |
| 38 | 0,011 | 11 | 27 | 8,4 | 1,3 | 42,48 | 0,635 |
| 42 | 0,012 | 12 | 30 | 8,75 | 1,37 | 44,7 | 0,67 |
| 46 | 0,013 | 13 | 33 | 9,09 | 1,43 | 46,81 | 0,70 |
| 49 | 0,014 | 14 | 35 | 9,42 | 1,48 | 48,18 | 0,726 |

В этом режиме будет действовать гетеропереход ($6 \cdot 10^{15}$ см⁻³) pGaAs–nGdS ($3 \cdot 10^{16}$ см⁻³), тогда толщина слоя объемного заряда будет определяться формулой [4, с. 51]

$$W_{p-n}^2 = \left[\frac{2\epsilon_1\epsilon_0\epsilon_2\epsilon_0(N_p + N_n)^2(V_D - V_2^{p-n})}{q(\epsilon_1\epsilon_0N_n + \epsilon_2\epsilon_0N_p)N_nN_p} \right], \quad (18)$$

где диэлектрическая проницаемость для GdS $\epsilon_1=9$ и для GaAs $\epsilon_2=11$, контактная разность потенциалов $V_D=1$ В.

Как показано на рис. 5, с увеличением толщины слоев объемного заряда по мере запираения p–n–гетеро- и металлополупроводникового m–p–переходов напряженность электрического поля возрастает линейно, что способствует повышению эффективности фотогенерации носителей с полем. Эта зависимость

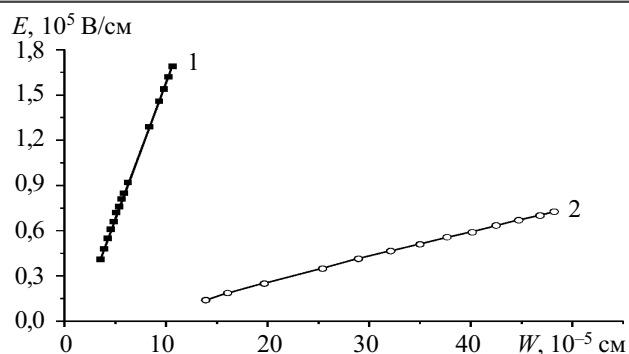


Рис. 5. Зависимости полей запираемого барьера m–pGaAs (1) и гетеро–p–n–перехода (2) с ростом толщины слоя объемного заряда

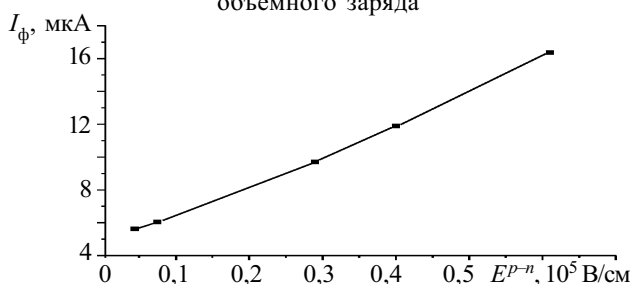


Рис. 6. Зависимость фототока от напряженности поля гетеро–p–n–перехода при освещенности 100 лк

подтверждается нарастающим увеличением фототока от напряженности электрического поля гетеро–p–n–перехода (рис. 6).

Заключение

Таким образом, на основе вольт-амперных характеристик симметричной и несимметричной двухбарьерных структур можно определить перераспределение потенциала между переходами, толщины слоев объемного заряда каждого перехода при заданных напряжениях, определить ход напряженности электрического поля, что позволяет оценивать частотный диапазон, а также зависимость фоточувствительности от поля.

Эти операции можно проводить и для случаев возбуждения оптическим или другим излучением.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Каримов А. В., Ёдгорова Д. М., Ваховов К. и др. Двухсторонне-чувствительные фотодиодные структуры в системе арсенид галлия—сульфид кадмия // Инженерно-физический журнал.— 2003.— Т. 76, № 1.— С. 167—169.
- Yodgorova D. M. Peculiarity of photosensitivity of three-barrier photodiode structure / V Intern. Young Scientists Conf. "Problems of Optics and High Technology Material Science".— Kyiv, Ukraine.— 2004.— P. 16.
- Аверин С. В. Определение характеристик контакта металл—полупроводник для встречно-штыревых фотодиодных структур // Письма в ЖТФ.— 1990.— Т. 16, вып. 4.— С. 49—53.
- Милнс А., Фойхт Д. Гетеропереходы и переходы металл—полупроводник.— М.: Мир, 1975.
- Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1.— М.: Мир, 1984.
- Karimov A. V., Karimova D. A. Three-junction Au/AlGaAs(n)/GaAs(p)/Ag photodiode // Materials Science in Semiconductor Processing.— 2003.— Vol. 6, Issues 1–3.— P. 137—142.
- А. с. 1675399 СССР. Трехбарьерный фотодиод Каримова / А. В. Каримов.— 1991.
- Пат. 933 РУз. Трехбарьерный фотодиод Каримова / А. В. Каримов.— 1994.

К. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО

Украина, г. Киев, Министерство промышленной политики
E-mail: nikol@industry.gov.ua

Дата поступления в редакцию
25.08 2005 г.

Оппонент к. т. н. А. О. КОСТИКОВ
(ИПМ им. А. И. Подгорного, г. Харьков)

АППАРАТНОЕ ПОСТРОЕНИЕ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ТЕПЛОТВОДА

При построении суперкомпьютеров предлагается использование приборных шкафов с водяным охлаждением, содержащих в теплопередающем тракте коллекторы из тепловых труб.

Потребность в высокопроизводительных цифровых вычислительных системах (суперкомпьютерах) из года в год возрастает [1, 2]. Это обусловлено необходимостью накопления и обработки все большего количества информации, решения все более сложных задач моделирования различных явлений и процессов.

Современные и перспективные суперкомпьютеры реализуются на основе сотен, а некоторые и тысяч, серийно выпускаемых микропроцессоров. Так, например, японская суперЭВМ "Earth Simulator" состоит из 5120 векторных процессоров NEC SX-6, американский суперкомпьютер ASCI/Alpha Server SC 45 — из 8192 процессоров, а российская кластерная суперЭВМ МВС-1000М содержит 768 процессоров Alpha 21264 [2, 3]. Значительная мощность тепловыделения, рассеиваемая суперкомпьютерами (например, в одном кластере МВС-1000/X-32 рассеивается около 5 кВт тепла [4]), и высокие значения плотности теплового потока современных микропроцессоров (порядка 100 Вт/см²) требуют применения эффективных систем охлаждения, что необходимо учитывать при выработке подходов к аппаратному построению перспективных суперкомпьютеров.

При построении мощных ЭВМ на основе современных процессоров чаще всего используется принцип компоновки функционально законченных модулей и кластеров в базовых несущих конструкциях (БНК) второго и третьего уровня, соответственно. С уменьшением массогабаритных характеристик элементной базы и увеличением плотности компоновки увеличивается количество теплоты, рассеиваемой в единице объема БНК. Без эффективной системы отвода тепла это приводит к повышению температуры элементов и снижению надежности работы модулей и вычислительной системы в целом. В связи с этим разработка физико-технических основ аппаратного построения суперкомпьютеров с повышенной эффективностью теплоотвода является весьма актуальной проблемой.

С целью обеспечения теплового режима электронных элементов (процессоров, БИС, СБИС и др.)

в состав БНК включают специальные элементы и устройства, предназначенные для отвода теплоты. Наиболее широкое распространение в силу своей простоты получили автономные и централизованные системы воздушного охлаждения. Они представляют собой встроенные в БНК третьего и второго уровня воздуховоды, каналы и отверстия, по которым продувается охлаждающий воздух, а также конструктивные элементы, улучшающие передачу теплоты от нагретых элементов к воздуху (металлические шины, теплопроводящие подложки плат и радиаторы). Для автономного охлаждения мощных процессоров к ним присоединяют индивидуальные радиаторы с вентиляторами (кулеры).

Поскольку конечной средой, поглощающей теплоту в таких системах охлаждения, является воздух, то их эффективность крайне ограничена. Кроме того, использование серийных процессоров с массивными радиаторами со встроенными вентиляторами приводит к существенному росту массогабаритных характеристик системы и создает повышенный уровень шумов.

Наиболее перспективными системами охлаждения вычислительных систем являются жидкостные [5, с. 40, 46]. Обеспечение жидкостного охлаждения съемных функциональных модулей и приборных шкафов осуществляется встраиванием в их БНК теплообменных пластин, плит, полок, межсекционных перегородок и других конструктивных элементов, по внутренним каналам которых прокачивают охлаждающую жидкость (воду, фреон). Внутренние каналы чаще всего выполняют в виде змеевиков [6, с. 181—183; 7, с. 355—358]. Передачу теплоты от функциональных модулей к охлаждаемому жидкостью конструктивным элементам приборного шкафа осуществляют с помощью теплопроводящих элементов конструкции модулей.

Использование жидкостного охлаждения вместо воздушного позволяет приблизительно на порядок увеличить количество теплоты, рассеиваемой одним приборным шкафом.

Недостатком таких схем теплоотвода является значительное гидравлическое сопротивление жидкостного тракта, обусловленное большим количеством ответвлений, поворотов, сужений, расширений и др., что требует дополнительных затрат энергии извне на прокачку теплоносителя.

Целью настоящего исследования является поиск новых подходов к аппаратному построению супер-

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

компьютеров, позволяющих использовать энергию отводимых от функциональных модулей тепловых потерь для интенсификации процессов теплопередачи в системе, и разработка на этой основе перспективных БНК с повышенной эффективностью теплоотвода.

В работе [8] впервые было предложено использовать в теплопередающем тракте приборного шкафа с жидкостным охлаждением эффект тепловых труб. Для этого в отдельных конструктивных элементах БНК были выполнены закрытые вакуумированные полости, стенки которых покрыты слоем капиллярной структуры, пропитанной жидким теплоносителем. Это позволило реализовать в таких конструктивных элементах высокоэффективный замкнутый испарительно-конденсационный цикл передачи теплоты от нагреваемых участков конструктивного элемента к наиболее холодным. Выравнивание температуры пара по полости конструктивного элемента обеспечивает равномерность температуры по всей его поверхности, а процессы испарения и конденсации теплоносителя в зонах подвода и отвода теплоты характеризуются высокими значениями коэффициентов теплоотдачи. Поддержание испарительно-конденсационного цикла передачи теплоты осуществляется за счет внутренней энергии системы в виде части утилизируемых тепловых потерь функциональных блоков. Высокая эффективная теплопроводность таких конструктивных эле-

ментов БНК позволяет существенно снизить суммарный перепад температуры по их длине по сравнению с металлическими теплопередающими элементами. За счет этого снижается общий перепад температуры между тепловыделяющим элементом и охлаждающей жидкостью.

Для реализации предложенного подхода в металлических полках шкафа были выполнены параллельные цилиндрические каналы, герметично закрытые с обоих концов стаканами, выходящими в вертикальные полости боковых стенок шкафа. Поверхности каждого канала и закрывающих его стаканов изнутри покрыты общим слоем капиллярной структуры, пропитанной жидким теплоносителем (дистиллированной водой, аммиаком, спиртом и др.). Капиллярная структура может быть выполнена в виде спеченных металлических порошков или волокон, в виде канавок или нескольких слоев металлической сетки. Перед заполнением теплоносителем полости каналов вакуумируются.

Другим вариантом выполнения предложенной схемы является встраивание в полки шкафа прямых цилиндрических тепловых труб (ТТ) с обеспечением надежного теплового контакта (рис. 1, а).

Тепловыделяющие функциональные модули устанавливаются в секции шкафа между полками и соединяют теплоотдающие периферийные участки модуля тепловым разъемом с поверхностью одной или двух полок. Отводимое тепло передается к теплорассеи-

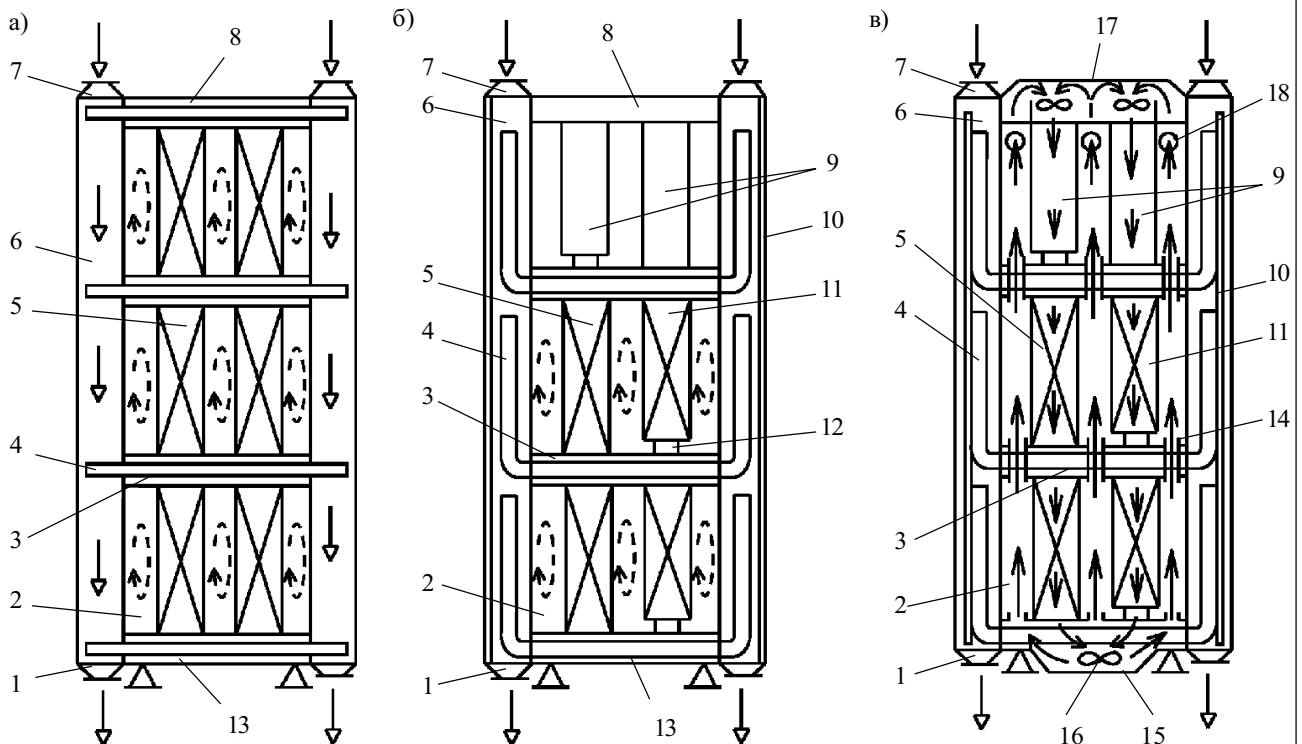


Рис. 1. Схемы БНК третьего уровня на основе прямых ТТ (а), U-образных ТТ (б) и U-образных ТТ с дополнительной продувкой секций шкафа воздухом (в):

1 — выходной фланец жидкостного канала; 2 — секция шкафа; 3 — межсекционная перегородка (полка); 4 — тепловая труба; 5 — тепловыделяющий модуль с двусторонним отводом теплоты; 6 — канал в боковой стенке шкафа для охлаждающей жидкости; 7 — входной фланец жидкостного канала; 8 — верхнее основание; 9 — нетепловыделяющие модули; 10 — паровая камера; 11 — тепловыделяющий модуль с односторонним отводом теплоты; 12 — устройство прижима; 13 — нижнее основание; 14 — вентиляционные отверстия в межсекционной перегородке (полке); 15 — нижний короб; 16 — вентилятор; 17 — верхний короб; 18 — отверстие в задней стенке верхней секции

↔, → — воздух (естественная и принудительная конвекция, соответственно); → — жидкость

вающим наружным поверхностям стаканов, расположенным в вертикальных полостях боковых стенок приборного шкафа. По полостям стенок прокачивается охлаждающая жидкость (вода), которая и поглощает переданную ей теплоту.

Поскольку эти полости не сообщаются с горизонтальными каналами полок, уменьшается общая длина охлаждающих каналов и исключаются их повороты, входные и выходные участки, сужения и расширения. Расчеты показывают, что гидравлическое сопротивление восьмисекционного приборного шкафа с предложенной схемой теплоотвода при расходе охлаждающей жидкости 0,24 кг/с и шахматном расположении стаканов в полостях боковых стенок составляет 20 Па. В то же время у известного приборного шкафа с воздушно-жидкостным охлаждением с прокачкой охлаждающей жидкости по зигзагообразным каналам полок при одинаковых прочих условиях оно равно $1,5 \cdot 10^5$ Па, а у приборного шкафа с прокачкой жидкости по параллельным каналам полок — 1000 Па.

Максимальная эффективность теплоотвода схемы с прямыми тепловыми трубами ограничена размерами теплоотдающей поверхности стаканов, что связано с типовыми размерами боковых стенок и полок шкафа. Кроме того, охлаждающая жидкость в полостях боковых стенок шкафа подогревается по мере прохождения от одной полки к другой. Это может привести к неравномерному нагреву элементов однотипных функциональных модулей, расположенных в приборном шкафу в разных секциях.

На рис. 1, б приведена схема усовершенствованной БНК с тепловыми трубами U-образной формы и вертикальными паровыми камерами в полостях боковых стенок [9]. Это позволило развить теплоотдающую поверхность тепловых труб и выровнять температуру охлаждающей жидкости по высоте жидкостного канала.

При аппаратном построении некоторых типов суперкомпьютеров целесообразным может оказаться использование схемы БНК, предусматривающей дополнительную продувку секций шкафа с модулями потоком охлаждающего воздуха (рис. 1, в). Такая

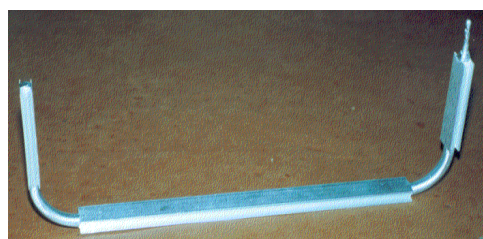


Рис. 2. Внешний вид ТТ

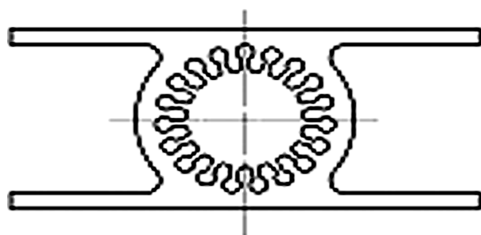


Рис. 3. Сечение ТТ

схема может найти применение в суперкомпьютерах, функциональные модули которых наряду с мощными элементами содержат значительное количество относительно маломощных элементов, чувствительных к перегреву (например конденсаторов).

Для экспериментальной оценки максимального количества отводимой теплоты разработаны макеты восьмисекционного приборного шкафа, каждая теплоотводящая полка которого состоит из семи тепловых труб U-образной формы. Были использованы тепловые трубы, изготовленные в лаборатории тепловых труб НТУУ “КПИ” (рис. 2, 3). Корпус тепловой трубы выполнен из алюминиевого профиля АС-КРА 7,5-Р2, ТУ 550.1-02070921.007-03. Капиллярная структура выполнена в виде 19 аксиальных канавок диаметром 1,1 мм, сообщающихся с общим паровым пространством ТТ. Внешний диаметр ТТ — 14 мм, размеры полок на испарительном участке — 30×420 мм, на конденсационном — 30×160 мм.

Были исследованы рабочие характеристики тепловых труб, заправленных аммиаком и ацетоном. Максимальный перепад температуры по длине ТТ с ацетоном составил 13°С при максимальной передаваемой мощности 300 Вт, для ТТ с аммиаком — 4,5°С при передаваемой мощности 500 Вт. Зона конденсации ТТ охлаждалась водой с температурой 18°С.

Исследования показали, что наиболее эффективным теплоносителем является аммиак, обеспечивающий теплоотвод 3500 Вт от одной полки шкафа, состоящей из семи ТТ, а от шкафа из восьми секций (семь теплоотводящих полок) — 24500 Вт.

Анализ существующих конструктивных схем БНК второго уровня и разработка новых перспективных схем на основе эффекта тепловых труб подробно изложены в [10]. На рис. 4 приведены рекомендованные для использования в перспективных вычислительных системах схемы БНК второго уровня. Наиболее предпочтительной с точки зрения эффективности теплоотвода и обеспечения эксплуатационной надежности является схема с использованием секционной коллекторной тепловой трубы (рис. 4, б). Отличие этой схемы от схемы с коллекторным термосифоном (рис. 4, а) состоит в том, что собирающий коллектор тепловой трубы разделен герметичными перегородками на отдельные секции по количеству испарительных каналов. Это дает возможность использовать, как и в предыдущей схеме, развитую поверхность зоны конденсации и теплового разъема и одновременно исключить неравномерное перераспределение теплоносителя между отдельными испарительными каналами.

Полученные в результате экспериментального исследования [10] зависимости перепада температуры по секции коллекторной тепловой трубы и максимальной температуры стенки испарительного канала от подводимого теплового потока показывают, что допустимая мощность электронных элементов, устанавливаемых в модуле с одной секцией, при температуре стенки испарительного канала 57°С составляет 102 Вт, с двумя секциями, соответственно, 204 Вт и с тремя секциями — 306 Вт. Эти показатели вполне соответству-

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

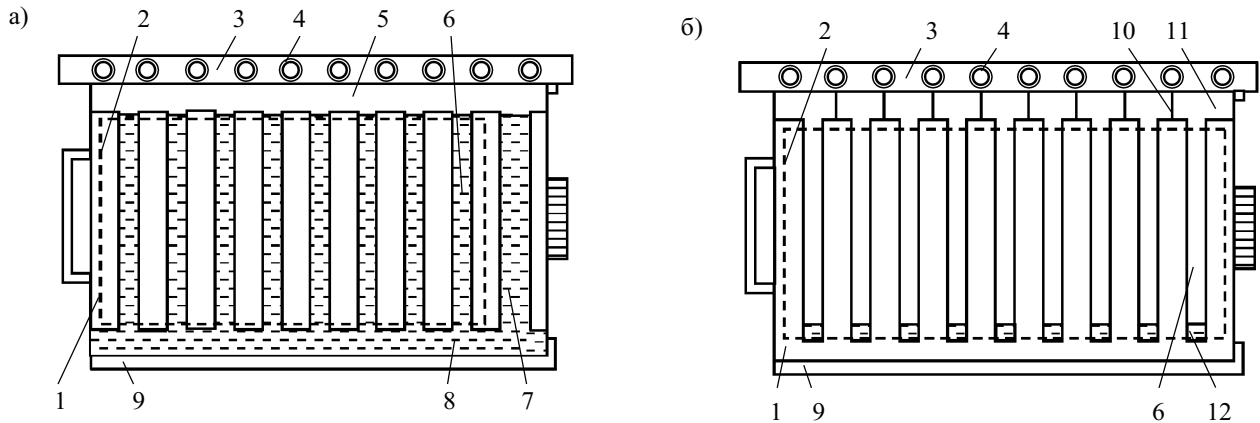


Рис. 4. Схемы БНК второго уровня с отводом теплоты к полке шкафа с помощью коллекторного термосифона (а) и секционной коллекторной тепловой трубы (б):

1 — печатная плата; 2 — границы области установки БИС и микропроцессоров; 3 — полка шкафа со встроенными тепловыми трубами; 4 — тепловая труба; 5 — собирающий коллектор; 6 — испарительный канал; 7 — возвратный канал; 8 — раздающий коллектор; 9 — опорное основание с механизмом прижима; 10 — герметичная перегородка; 11 — конденсационная зона секции коллекторной тепловой трубы; 12 — избыток теплоносителя

ют уровню тепловыделений функциональных модулей современных суперкомпьютеров.

Вместе с тем тенденции развития вычислительной техники свидетельствуют о безусловном увеличении мощности тепловыделений уже в ближайшем будущем. Учитывая это, на сегодняшний день уже разрабатаны и изготавливаются макеты предложенных БНК для экспериментального исследования термического сопротивления отдельных участков теплопередающего тракта — от места установки элементов до охлаждающей жидкости. Это позволит выявить наиболее проблемные участки и наметить пути снижения их термического сопротивления. (Можно предположить, что одним из таких участков будет тепловой разъем между функциональным модулем и полкой шкафа. Эта задача требует своего решения в последующих разработках, т. к. конструкция теплового разъема должна одновременно обеспечивать простое и быстрое извлечение модуля и как можно более низкое термическое сопротивление.)

Таким образом, полученные предварительные результаты экспериментального исследования U-образных и секционных коллекторных тепловых труб, являющихся основой БНК, свидетельствуют о высокой эффективности и практической применимости предлагаемых технических решений.

В дальнейшем необходимо более подробно исследовать макеты БНК третьего и второго уровней с целью оценки возможностей и технических характе-

ристик предложенных БНК. Это позволит выбрать пути дальнейшего повышения эффективности охлаждения БНК для перспективных вычислительных систем.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Коваль В. Н., Савьяк В. В., Сергиенко И. В. Тенденции развития современных высокопроизводительных систем // Управляющие системы и машины. — 2004. — № 6. — С. 31—43.
2. Аладышев О. С., Дикарев Н. И., Овсянников А. П. и др. СуперЭВМ: области применения и требования к производительности // Известия вузов. Электроника. — 2004. — № 1. — С. 13—17.
3. Опубликовано 23-я редакция TOP 500. Китай врывается в суперкомпьютерную элиту // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. — 2004. — № 4. — С. 49.
4. Левин В. К. Создание и применение суперкомпьютеров в России (современность и ближайшая перспектива) // Радиоэлектроника и управление. — 2003. — № 7—9. — С. 61—62.
5. Резников Г. В. Расчет и конструирование систем охлаждения ЭВМ. — М.: Радио и связь, 1988.
6. Савельев А. Я., Овчинников В. А. Конструирование ЭВМ и систем. — М.: Высш. школа, 1989.
7. Ненашев А. П. Конструирование радиоэлектронных средств. — М.: Высш. школа, 1990.
8. А. с. 1050144 СССР. Шкаф для охлаждения радиоэлектронной аппаратуры / В. С. Лазебный, Ю. Е. Николаенко, М. Г. Семена, А. П. Яковенко. — 1983. — Бюл. № 39.
9. Деклар. пат. 58839 А Украины. Шафа для радіоелектронної апаратури / Ю. Є. Ніколаєнко. — 2003. — Бюл. № 8.
10. Николаенко Ю. Е. Схемные решения организации теплоотвода от функциональных модулей ЭВМ с помощью двухфазных теплопередающих элементов и устройств // Управляющие системы и машины. — 2005. — № 2. — С. 29—37.

НОВЫЕ КНИГИ

Федоров В., Сергеев Н., Кондрашин А. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств. — М.: Техносфера, 2005.

Руководство по методикам и технологиям проведения испытаний РЭС на климатические, механические, радиационные и специальные воздействия. Подробно изложены статистические методы контроля качества и физико-технические основы испытательных методик. Для широкого круга студентов и преподавателей технических университетов, инженеров-разработчиков и практиков, работников центров испытаний и сертификации.

Д. т. н. А. Ф. БЕЛЯНИН, д. ф.-м. н. М. И. САМОЙЛОВИЧ,
к. т. н. В. Д. ЖИТКОВСКИЙ, к. т. н. А. Л. КАМЕНЕВА

Россия, г. Москва, ЦНИТИ "Техномаш",
г. Березники, Пермский гос. технический ун-т
E-mail: samoylovich@technomash.ru, kameneva@pstu.ru

Дата поступления в редакцию
05.07 2005 г.

Оппонент д. т. н. Ю. А. ЗАГОРУЙКО
(Ин-т монокристаллов, г. Харьков)

УДАРСТОЙКИЕ ЗАЩИТНЫЕ ПЛЕНОЧНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ AlN В ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ

Для формирования защитного покрытия AlN, стойкого к воздействию ударных нагрузок, пригодны методы магнетронного и диодного распыления, а также распыления ионным пучком.

Защитные покрытия элементов электронной техники изготавливают, как правило, многослойными, где каждый из слоев играет определенную роль. Например, в покрытии SiO/Al₂O₃, используемом в устройствах термопечати, слой SiO служит для защиты термопечатающих элементов от окисления, а слой Al₂O₃ предохраняет от механического воздействия. Вместе с тем известные защитные покрытия не предохраняют от воздействия ударных нагрузок. Рассмотрению этой задачи и посвящена настоящая работа.

Для защиты различных элементов электронной техники в условиях воздействия ударных механических нагрузок наиболее перспективны тонкопленочные покрытия на основе AlN. Выбор AlN обусловлен его высокой твердостью (7—8 по шкале Мооса) и теплопроводностью (140...280 Вт/(м·К)), а также химической инертностью и, в частности, стойкостью к воздействию кислот и щелочей.

Пленочные покрытия AlN могут быть сформированы эпитаксией из паровой фазы, реактивной молекулярно-лучевой эпитаксией, магнетронным ВЧ- и на постоянном токе распылением, диодным реактивным ВЧ-распылением, распылением ионным пучком, а также ионной имплантацией азота в алюминиевое пленочное покрытие [1—4]. Ряд методов из вышеприведенных непригоден для получения защитных покрытий элементов электронной техники. Например, проведение эпитаксии из паровой фазы и реактивной молекулярно-лучевой эпитаксии связано с высокими (1300 К) температурами и применением монокристаллических подложек. В свою очередь ионная имплантация азота в Al требует нанесения сплошного пленочного покрытия алюминия (что приводит к короткому замыканию проводников).

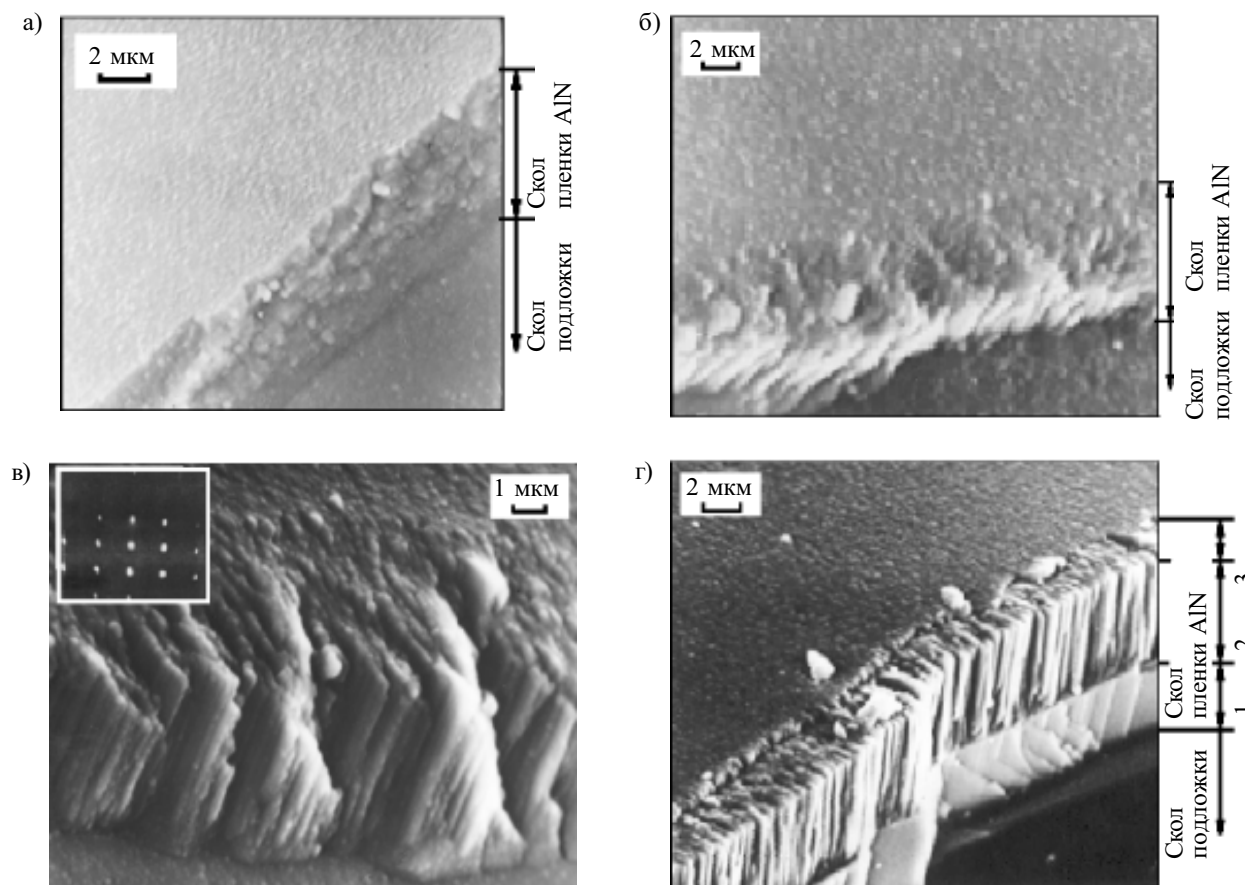
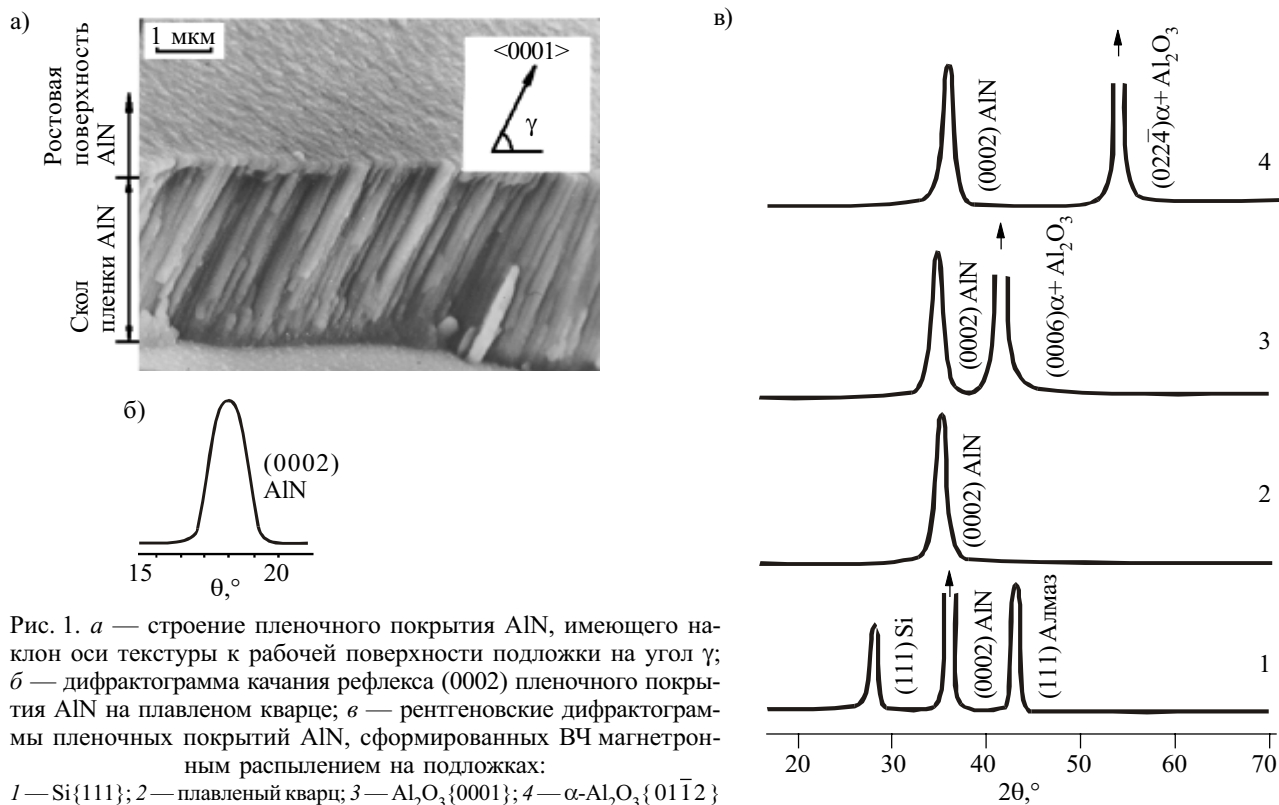
Для формирования защитного покрытия, стойкого к воздействию ударных нагрузок, пригодны методы магнетронного и диодного распыления, а также распыления ионным пучком [5—7]. Данные методы характеризуются направленностью потока пленкообразующих частиц и неравновесными условиями формирования пленочного покрытия. В зависимости от

условий проведения процесса это приводит к различной степени кристалличности (содержание кристаллической фазы в объеме пленочного покрытия, J), а при определенных параметрах процесса — к образованию совершенных аксиальных текстур пленочных покрытий, проявляющихся у веществ с алмазоподобной решеткой в виде волокнистого строения. Для пленочных покрытий AlN (структура вюрцита) нормальный рост происходит в направлении $\langle 0001 \rangle$. При формировании AlN в неравновесных условиях ось текстуры всегда совпадает с направлением оси волокон (рис. 1, а).

В объеме пленочного покрытия формируются иглообразные зерна диаметром 0,2—1 мкм, вытянутые по направлению оси $\langle 0001 \rangle$ текстуры. Метод магнетронного ВЧ-распыления позволяет получать текстурированные пленочные покрытия AlN, имеющие волокнистое строение, независимо от материала защищаемой поверхности (ситалл, металлические контакты, резистивный слой).

На рентгеновских дифрактограммах (рис. 1, б), снятых с пленочных покрытий AlN, в области брэгговских углов $2\theta = 10...140^\circ$ наблюдаются дифракционные максимумы, соответствующие отражениям только (0002) и (0004) AlN ($2\theta = 36,04^\circ$ и $2\theta = 76,45^\circ$, $\text{Cu}_{K\alpha}$ -излучение), которым соответствуют межплоскостные расстояния d/n , равные 0,2492 и 0,1246 нм. Отсутствие других отражений у всех полученных пленочных покрытий AlN обусловлено наличием текстуры роста с осью по $\langle 0001 \rangle$. Разориентация зерен относительно оси $\langle 0001 \rangle$, измеренная по дифрактограммам качания, находится в пределах $0,5—2,5^\circ$ (рис. 1, б).

При малых скоростях осаждения пленочных покрытий, а также в отсутствие или при малой величине положительного электрического смещения на подложкодержателе, формируются пленочные покрытия, состоящие из равноосных разупорядоченных кристаллитов (рис. 2, а). Изменение условий синтеза способствует формированию кристаллитов в виде волокон (рис. 2, б). Угол разориентации смежных волокон в плоскости подложки невелик, поэтому в ряде случаев имеет место объединение соседних волокон, что характеризует еще большее упорядочение структуры пленочного покрытия и формирование ограниченной текстуры (рис. 2, в, на врезке представлена электронограмма, полученная на отражение). Строение поверхности образования и скола пленочного покрытия AlN, полученного на подложке из Al₂O₃ (01 $\bar{1}2$), показыва-



ет (при соответствующих изменениях параметров процесса осаждения) переход пластинчатого строения в волокнистое и мелкозернистое с равноосными зернами (рис. 2, з).

Угол наклона оси текстуры (γ) к рабочей поверхности подложки определяли по дифрактограммам качания. Угол наклона оси текстуры, зависящий только от направления потока пленкообразующих частиц, равен 90° (ось текстуры перпендикулярна рабочей поверхности подложки) для пленочных покрытий, сформированных на подложках, установленных против центра мишени.

Величина угла наклона оси текстуры к рабочей поверхности подложки зависит от конструкции магнетронного источника и взаимного положения подложки и мишени. Например, уменьшение угла наклона оси текстуры к рабочей поверхности подложки по мере удаления подложки от центра мишени составляет примерно 1° на 5 мм при дистанции "мишень — подложка" 60 мм, расстоянии 17 мм от центра мишени до внутреннего кольцевого ряда магнитов и 50 мм до внешнего кольцевого ряда магнитов.

Устойчивость текстурированных пленочных покрытий AlN к истирающим нагрузкам выше, чем у защитного покрытия на основе $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$. Она обеспечивается как при большой концентрации в защитном покрытии кристаллического AlN, так и при контакте термочувствительной бумаги с поверхностью защитного покрытия по наиболее твердому направлению кристаллической решетки AlN — $\langle 0001 \rangle$ (в защитном покрытии на основе $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$, сформированном известными методами, текстура отсутствует). Наибольшая твердость AlN в направлении $\langle 0001 \rangle$ объясняется тем, что указанное направление является направлением наиболее плотной упаковки его атомов в кристаллической решетке. Максимальный защитный эффект поликристаллического слоя при ударных и истирающих нагрузках достигается при расположении оси текстуры $\langle 0001 \rangle$ и совпадающих с ней осей кристаллитов под углом $\gamma > 75^\circ$ к плоскости подложки.

Повышение устойчивости к ударным нагрузкам игольчатой структуры зерен, ориентированных параллельно оси текстуры и параллельно действию ударных нагрузок, определяется рядом факторов. В кристаллах AlN со структурой вюрцита имеется две основных системы скольжения — $\{10\bar{1}0\}$ и $\{0001\}$. Возможность участия той или иной системы скольжения в пластической деформации оценивается фактором Шмида (m): $m = \cos\varphi - \sin\alpha$, где φ — угол между направлением нагрузки и нормалью к плоскости скольжения, а α — угол между направлением нагрузки и сдвига. При совпадении направления удара и оси зерен (волокон) фактор Шмида для обеих систем скольжения равен нулю (в случае $\{10\bar{1}0\}$ $\varphi=0$, $\alpha=0$, а для $\{0001\}$ $\varphi=1$, $\alpha=0$), тогда как при несовпадении направления удара и оси волокон фактор Шмида отличен от нуля. Если имеет место отклонение оси текстуры (оси волокон) от направления удара (нормаль к плоскости подложки) на 10° , фактор Шмида для системы скольжения $\{0001\}/[11\bar{2}0]$ равен 0,15 (максимально возможное значение фактора Шмида 0,5). Поскольку образование трещин в хрупких те-

лах возможно на пересечении полос скольжения, возникновение пластической деформации в зонах механически стойких покрытий крайне нежелательно.

Помимо процесса пластической деформации и связанного с ним разрушения возможно хрупкое разрушение по границам зерен и по плоскостям спайности внутри зерен (плоскость спайности для кристаллов со структурой вюрцита $\{10\bar{1}0\}$ параллельна направлению удара). Следует заметить, что отдельные волокна пленочного покрытия состоят из когерентных мелких волокон (размер области когерентного рассеяния пленочных покрытий AlN равен 40—60 нм). В случае пленочного покрытия, состоящего из равноосных кристаллов с той же текстурой по $\langle 0001 \rangle$, нагружение приводит к образованию сетки мелких трещин по плоскостям $\{10\bar{1}0\}$ (которые являются как плоскостями спайности, так и границами таких зерен), а также к последующему окислению тонкопленочных проводников, выкрашиванию и полному истиранию защитного слоя.

В тонковолокнистом защитном слое, формируемом магнетронным ВЧ-распылением, промежутки между волокнами заполнены аморфной фазой AlN. Это подтверждается а) заниженными интенсивностями рефлексов (0002), несмотря на сильно выраженную текстуру; б) отсутствием гладких сколов, характерных для обычных мелкокристаллических пленочных покрытий (где разрушение идет в основном по спайности). В рентгеноаморфном пленочном покрытии обычно наблюдается гладкий раковистый скол, способный распространяться по всему тонкопленочному покрытию из-за изотропного строения. В рассматриваемом случае структура пленочного покрытия представляет композит, армированный тонкими игольчатыми волокнами с сильно шероховатой боковой поверхностью, промежутки между которыми полностью заполнены когерентной с ними аморфной фазой.

Выход из строя при работе с ударными нагрузками таких элементов электронной техники, как термопечатающие головки, обусловлен растрескиванием и отслоением защитного покрытия. Наклон оси текстуры, совпадающей с осью зерен пленочного покрытия, к рабочей поверхности подложки на угол меньше 75° приводит к резкому увеличению пластической деформации и выходу термопечатающей головки из строя при растрескивании защитного покрытия и связанным с ним процессом окисления тонкопленочных проводников и резисторов. Разрушение по спайности может происходить не только при механических ударах, но и при термоциклах, что нежелательно для термопечатающих головок, работающих только на истирание.

При толщине защитного покрытия < 1 мкм термопечатающая головка (ТПГ) выходит из строя в результате хрупкого разрушения, происходящего, очевидно, из-за невысокой степени кристалличности и, как следствие этого, недостаточно яркой выраженности игольчатого (волокнистого) строения, проявляющейся на ранней стадии формирования текстуры. При толщине защитного покрытия более 10 мкм ТПГ через 20—40 часов выходят из строя в результате растрескивания и отслаивания защитного покрытия по

причине увеличения внутренних напряжений в пленочном покрытии и достижении критической величины при толщине пленочного покрытия примерно 10 мкм.

В качестве защитных покрытий устройств термопечати могут быть использованы пленочные покрытия AlN, входящие в состав многослойных структур.

Таблица 1
Параметры получения защитных покрытий для термопечатающих матриц

| Слой | Давление P, Па | Состав газовой смеси C | Расстояние "мишень—подложка" H, мм | Температура разогрева T _п , К | U _{см} , В |
|-----------------------------------|----------------|---|------------------------------------|--|---------------------|
| AlN _{ам} | 0,8 | 60 об.% N ₂ + 40 об.% Ar | 90 | 573 (473*) | -50 |
| AlN _{кр} | 0,8 | 60 об.% N ₂ + 40 об.% Ar | 90 | 573 (473*) | +45 |
| Al ₂ O _{3 ам} | 0,8 | 60...70 об.% O ₂ + 40...30 об.% Ar | 90 | 573 (473*) | -50 |

*Для защитного покрытия ТТМ-28.

Многослойные защитные покрытия получали последовательным нанесением на поверхности термопечатающих матриц [8] слоев аморфных AlN и Al₂O₃ (AlN_{ам}, Al₂O_{3ам}), а также кристаллического AlN (AlN_{кр}) с внутренним волокнистым строением слоя. Четырехслойное защитное покрытие AlN_{ам}/AlN_{кр}/Al₂O_{3ам}/AlN_{кр} тонкопленочных термопечатающих матриц (ТТМ) формировали ВЧ-распылением Al-мишени. В процессе распыления последовательно устанавливали газовую смесь из Ar+N₂ или Ar+O₂ и отрицательное или положительное электрическое смещение на подложкодержателе (U_{см}) (табл. 1). Слой AlN_{ам} (толщина 0,2—0,4 мкм, теплопроводность λ≈200 Вт/(м·К)) обеспечивал адгезию многослойного покрытия и защиту Ta-резисторов термопечатающей матрицы от окисления при осаж-

дении Al₂O₃. Слой аморфного Al₂O₃ (0,2—0,4 мкм, λ≈13 Вт/(м·К)) фокусировал тепловые потоки от Ta-резисторов, обеспечивая качество печати. Качество печати регулировали также созданием в слое AlN_{кр} прослойки из Al₂O₃·AlN толщиной 0,4 мкм, формируемой распылением Al в газовой смеси Ar+O₂+N₂.

Механическим напряжением защитного покрытия и его износостойкостью управляли изменяя степень кристалличности (J) формируемых слоев AlN_{кр} (толщина 1,0—1,5 мкм и 2,6—3,6 мкм, λ=200...280 Вт/(м·К)). Ориентация зерен кристаллической фазы соответствовала направлению воздействия механических нагрузок в процессе эксплуатации матрицы. Суммарная толщина защитного покрытия термопечатающей головки определялась условиями формирования резисторов и проводников.

Защитные покрытия наносились с использованием модернизированных промышленных установок УВН-62П-3, КАТОД-1М [4] и специально разработанной установки, оснащенной цилиндрическим магнетроном, ПЛАЗМА-3МЦ [1]. Микросхемы изготавливались на ситалловых подложках со слоем TaAlO_y. Слой TaAlO_y получали окислением металлического пленочного покрытия с градиентом состава по толщине от Al до Ta, сформированного распылением составной мишени (Al+Ta, 1:1 по поверхности). Суммарная толщина защитного покрытия должна обеспечивать Δh=2,5 мкм (рис. 3, а).

Применение процесса анодирования позволило уменьшить (по сравнению с процессами травления) высоту ступеней на поверхности матрицы до 0,3—0,5 мкм при суммарной толщине Al-проводников и Ta резистивного слоя, равной 2 мкм, а следовательно, и минимально необходимую толщину защитного покрытия, суммарное значение которой составляло 3—5 мкм (рис. 3, б). Строение скола слоя Al₂O₃, полученного методом анодирования, показано на рис. 4.

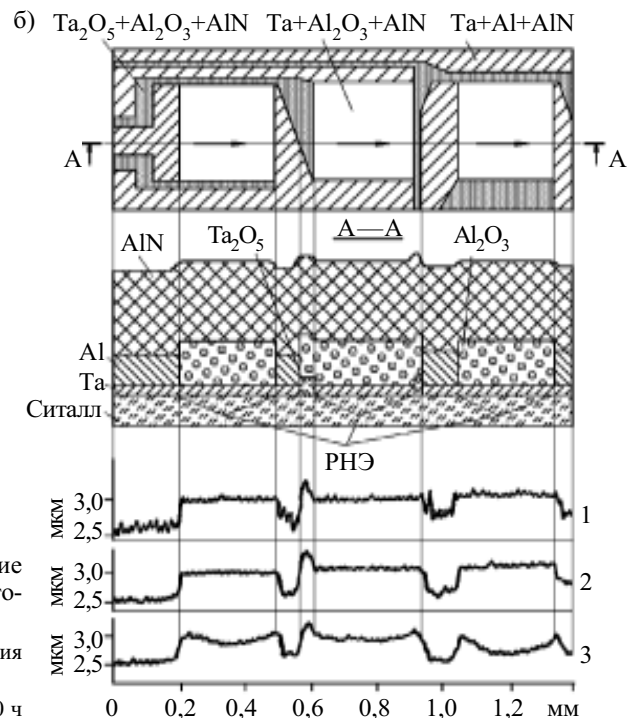
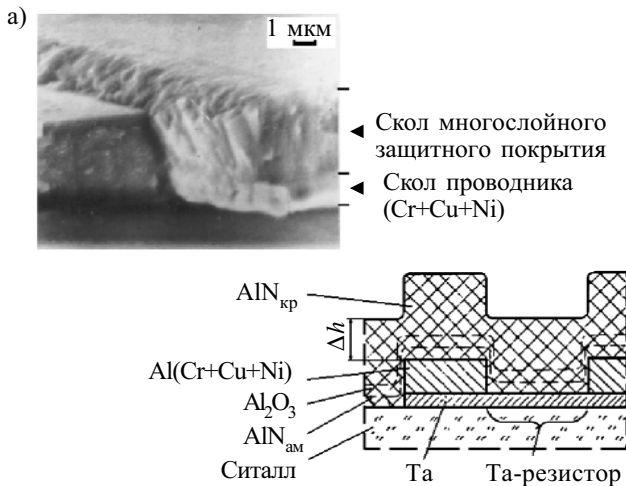


Рис. 3. Электронно-микроскопический снимок и строение фрагментов поперечных разрезов ТТМ, в которых резисторы и проводники сформированы:

а — методом химического травления; б — методом анодирования (РНЭ — резистивный нагревательный элемент)

1 — до начала эксплуатации; 2 — через 100 ч; 3 — через 600 ч

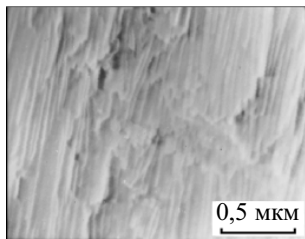


Рис. 4. Электронно-микроскопический снимок скола слоя Al_2O_3 , сформированного электролитическим окислением Al

Результаты испытаний работоспособности многослойных защитных покрытий, нанесенных магнетронным распылением, представлены в табл. 2.

Формирование слоев $AlN_{ам} + Al_2O_3_{ам} + AlN_{кр}$ защитного покрытия ТГМ-28 для термопечатающих матриц проводилось при $T_{п} < 473$ К в связи с применением сплава Sn–Bi (температура плавления 503 К), наносимого на контактные площадки.

Проведены испытания матриц в условиях воздействия ударных нагрузок: частота ударов термопечатающей головки 20 Гц; давление, действующее на поверхность ТПГ в момент ее контакта с теплочувствительной бумагой $3 \cdot 10^2$ кПа; длительность импульса печати 10 мс. Эксплуатация указанных матриц строчного типа осуществлялась при скорости печати 21 знак/с, давлении прижима $0,3 \cdot 10^2$ кПа, длительности импульса печати 15 мс. Танталовые резисторы в процессе эксплуатации матриц разогревались до 573 К.

В результате испытаний было обнаружено, что после эксплуатации в течение 600 ч уменьшение толщины защитного покрытия составляет <15%. Изменение электрического сопротивления Та-резистора в конце испытаний не превышает +10%. После 600 ч эксплуатации ($4,3 \cdot 10^7$ циклов печати) матрица остается работоспособной (рис. 3, б). Ресурс работы испытуемых матриц с защитным покрытием из AlN толщиной 2,5–3 мкм более чем в 200 раз превышает ресурс работы аналогичных матриц, выполненных с двухслойным защитным покрытием на основе SiO_2 (2,5 мкм) и Al_2O_3 (2,5 мкм). За время испытаний (>600 ч) изменений в защитном покрытии не обнаружено.

Испытания показали, что матрицы с защитным покрытием на основе AlN работоспособны в диапазоне температур от 213 до 355 К и влажности 80–90% [9]. Использование покрытия в составе термопечатающих матриц позволило увеличить срок служ-

Таблица 2

Результаты испытаний работоспособности покрытий $AlN/Al_2O_3/AlN$ устройств термопечати

| Толщина покрытия, мкм | | | Время наработки, ч | Размытие пятна при печати, % | Примечание |
|-----------------------|-----------|-----|--------------------|------------------------------|---|
| AlN | Al_2O_3 | AlN | | | |
| 0,2 | 0,1 | 2 | >250 | 65 | — |
| 0,2 | 0,2 | 2 | >250 | 15 | — |
| 0,2 | 0,4 | 2 | >250 | 12 | — |
| 0,2 | 0,5 | 1,5 | — | — | Отслаивание защитного покрытия в процессе нанесения |
| 0,2 | 0,3 | 0,8 | 15 | 16 | Разрушение ТПГ из-за растрескивания и выкрашивания защитного слоя |

бы термопечатающих устройств примерно в 3 раза. Нанесение многослойного защитного покрытия на основе AlN (вместо $SiO_2/Si/Si_3N_4$) на матрицы с мезоструктурой увеличило их ресурс более чем в 2 раза.

Была рассмотрена возможность получения защитных покрытий на основе AlN для измерительных датчиков.

Проведенный анализ показал, что пленочные покрытия, осажденные методами распыления, содержат рентгеноаморфную фазу, состоящую, по результатам оже-электронной спектроскопии (оже-электронный микроанализатор электронного микроскопа TESLA BS-350), из азота и алюминия (1:1). Степень кристалличности пленочных покрытий AlN в зависимости от условий проведения процесса осаждения изменяется от 0 (аморфные пленочные покрытия) до 100%. Сформированные магнетронным распылением пленочные покрытия AlN имеют волокнистое (столбчатое) строение с ориентированием волокон по <0001>, соответствующему направлению оси текстуры (рис. 5). Рентгеноаморфная фаза пленочных покрытий заполняет промежутки между волокнами.

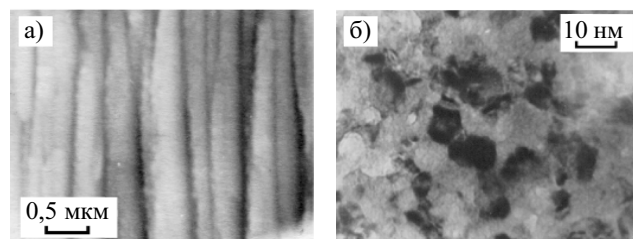


Рис. 5. Строение пленочных покрытий AlN, используемых в качестве защитных покрытий датчиков:

а — поперечный скол пленочного покрытия толщиной 5 мкм (растровая электронная микроскопия); б — пленочное покрытие толщиной 30 нм (просвечивающая электронная микроскопия)

Для практического применения в качестве защитных покрытий измерительных датчиков требуются пленочные покрытия со степенью кристалличности 50–60 об.%. С защитным покрытием из поликристаллического, текстурированного по <0001> AlN были изготовлены датчики линейных и круговых микроперемещений [10, 11], которые устанавливались в координатных механизмах и устройствах позиционирования для объектов микроэлектроники. Изготовленные датчики работали с трением и без трения. Толщина наносимого слоя AlN подбиралась таким образом, чтобы она соответствовала максимуму пропускания на рабочей длине волны и составляла $\lambda_0 = 0,3 \dots 0,5$ мкм. Зависимость оптического пропускания (τ) от λ_0 стекла К-8, используемого для изготовления оптических растров, и стекла К-8 с пленочным покрытием AlN толщиной 1 мкм приведена на рис. 6.

Изготовленные растры имели различные геометрические размеры и представляли собой оптическое стекло с нанесенной на него сеткой полос из Cr (толщина 0,1 мкм, минимальная ширина 2 мкм и шаг 4 мкм, рис. 7). Область с сеткой полос Cr покрывали защитным пленочным покрытием AlN.

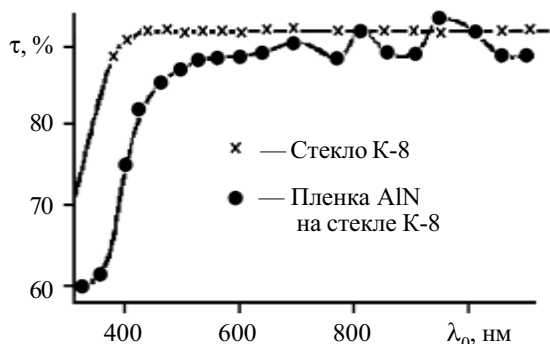


Рис. 6. Зависимость оптического пропускания от длины волны для образцов из стекла и стекла с пленочным покрытием AlN

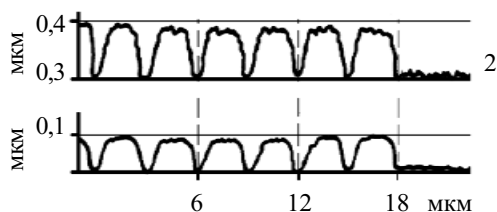


Рис. 7. Профилограммы поверхности растра: 1 — полосы Si на плавленом кварце; 2 — та же структура с пленочным покрытием AlN

У датчика, работающего с трением, растры находятся в контакте. Ресурс работы измерительных растров без защитного покрытия, работающих с использованием иммерсионной жидкости, — 12 часов. С защитным пленочным покрытием на основе AlN ни один растр не вышел из строя после эксплуатации в течение более 200 ч. Ресурс работы в 10^6 перемещений растров в две стороны с амплитудой 5 мм (усилие прижима растров 0,1 кПа) не приводит к видимым изменениям защитного покрытия. Разрешающая способность устройства — 0,1 мкм.

Аналогичная конструкция, предназначенная для работы в режиме без трения, была использована в датчике линейного перемещения фотоприемного устройства измерителя апертуры световодов Фотон-3-02. Размеры датчика 17×45 мм, размеры элементов датчика $3 \times 0,05 \pm 0,002$ мм, шаг между элементами датчика от 0,209 до 2,8 мм. Пластины датчика перемещаются с зазором 0,1 мм.

Нанесение защитных покрытий проводили при следующих условиях: $P=0,8$ Па, $C_{N_2}=60$ об.%, $H=90$ мм, $T_{II}=473$ К. Использовались модернизированные установки УВН-62П-3 и КАТОД-1М. Защитное покрытие AlN (как аморфного, так и кристаллического строения) позволило довести гарантийный срок службы устройства до $2 \cdot 10^4$ ч при нормальных условиях эксплуатации в не защищенной от пыли среде.

Для сопоставления были исследованы защитные пленочные покрытия SiO_2 и Al_2O_3 , которые наносились методом электронно-лучевого испарения на установке УВН-2М-1. Полученные пленочные покрытия были рентгеноаморфными или мелкокристаллическими с величиной областей когерентного рассеяния рентгеновских лучей (ОКР) 2—4 нм и, по данным электронной микроскопии, не имели внутреннего волокнистого строения. Толщина нарощенных пленочных покрытий SiO_2 составляла 0,5—1,5 мкм, а Al_2O_3 — 2,5—5 мкм при суммарной толщине защитного покрытия 4—6 мкм.

Испытания показали, что в условиях воздействия истирающих нагрузок целостность защищаемых элементов с защитным покрытием на основе AlN намного превышает аналогичные параметры устройств с защитным покрытием из SiO_2 и Al_2O_3 — материалов, превосходящих AlN по микротвердости. В табл. 3 приведены покрытия, используемые для защиты от истирания [12].

Таблица 3

Состав и свойства покрытий, используемых для защиты от истирания

| Состав защитного покрытия | Толщина защитного покрытия, мкм | Максимальная толщина слоя Si, мкм | Наличие текстуры | Строение защитного покрытия | Наклон оси текстуры, ° | Работа при максимальной нагрузке, ч | Особенности поведения при максимальной нагрузке |
|---------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------------------|---|
| AlN | 2,1 | 1 | Аксиальная <0001> | Волокнистое | 82 | >250 | — |
| AlN | 9,5 | 1 | То же | То же | 75 | >250 | — |
| AlN | 11 | 1 | " | " | 80 | 26 | Растрескивание и отслаивание |
| $SiO+Al_2O_3$ | 5,4 (0,5+4,9) | 1 | — | Рентгеноаморфное | — | 16 | То же |
| $SiO+Al_2O_3$ | 4 (1,5+2,5) | 1 | — | Равноосные зерна | — | 20 | " |
| $SiO_2+Al_2O_3$ | 6,3 (2,5+3,8) | 1 | — | То же | — | 12 | " |
| $SiO_2+Al_2O_3$ | 6,7 (0,5+6,2) | 1 | — | Рентгеноаморфное | — | 8 | " |

Заключение

Использование защитного покрытия ТТМ-28 на основе AlN в составе термопечатающих матриц позволило увеличить срок службы термопечатающих устройств почти в 3 раза. Нанесение многослойного защитного покрытия на основе AlN (вместо SiO₂/Si/Si₃N₄) на матрицы с мезаструктурой увеличило их ресурс более чем в 2 раза. Защитное покрытие AlN (как аморфного, так и кристаллического строения) позволило довести гарантийный срок службы устройства до 2·10⁴ ч при нормальных условиях эксплуатации в не защищенной от пыли среде.

Для обеспечения комплекса необходимых свойств термопечатающих матриц (направленность теплоотвода, износостойкость, электросопротивление, защита от окисления и др.) необходимо формировать многослойное покрытие, содержащее не только слои различных материалов, но и одного материала различного строения.

Формирование пленочных покрытий AlN, содержащих заданное количество ориентированной (текстура) кристаллической фазы, позволяет на порядок повысить износостойкость элементов электронной техники по сравнению с защитными материалами, имеющими большую твердость.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Белянин А. Ф., Самойлович М. И. Пленки алмаза и алмазоподобных материалов: формирование, строение и применение в электронике / В кн.: Высокие технологии в промышленности России (материалы и устройства электронной техники).— М.: ОАО ЦНИТИ «Техномаш», 2003.— С. 19—110.
2. Белянин А. Ф., Житковский В. Д., Пашенко П. В. Пленки нитрида алюминия: получение, строение и применение в устройствах электронной техники // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания.— 1998.— Вып. 1.— С. 29—37.

3. Белянин А. Ф., Бульенков Н. А., Тер-Маркарян А. А. и др. Структурные особенности пленок нитрида алюминия, полученных высокочастотным магнетронным распылением // Техника средств связи. Сер. ТПО.— 1983.— Вып. 1.— С. 41—45.

4. Белянин А. Ф. Применение в электронной технике легированных пленок ALN, выращенных ВЧ-магнетронным распылением // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания.— 2002.— № 1-2.— С. 74—82.

5. Каменева А. Л., Житковский В. Д., Александров Д. В., Самойлович М. И. Изучение физико-химического взаимодействия на границах раздела фаз в слоистых материалах и покрытиях / Тр. XI междунар. науч.-техн. конф. «Высокие технологии в промышленности России».— Москва.— 2003.— С. 158—167.

6. Каменева А. Л., Александров Д. В., Белянин А. Ф. и др. Пленки ALN, ZrN, TiZrN: технологические особенности формирования / Тр. II Межрегион. семинара «Нанотехнологии и фотонные кристаллы».— Калуга.— 2004.— С. 232—249.

7. Каменева А. Л., Александров Д. В., Белянин А. Ф. и др. Структурные и морфологические особенности упрочняющих покрытий, получаемых методами магнетронного распыления и вакуумного испарения / Там же.— С. 126—168.

8. Belyanin A. F., Bouilov L. L., Zhirnov V. V. et al. Application of aluminium nitride films for electronic devices // Diamond and Related Materials.— 1999.— Vol. 8.— P. 369—372.

9. Белянин А. Ф., Самойлович М. И., Семенов А. П. Пленки алмаза и алмазоподобных материалов: формирование, строение и применение в электронике / В кн.: Материалы, оборудование и технологии нанoeлектроники и микрофотоники.— Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2003.— С. 77—180.

10. Самойлович М. И., Белянин А. Ф., Житковский В. Д., Багдасарян А. С. Наноструктурные углеродные материалы в тонкопленочной технологии // Инженерная физика.— 2004.— № 1.— С. 37—56.

11. Белянин А. Ф., Самойлович М. И., Александров Д. В. и др. Пленочные покрытия на основе AlN для оптических датчиков / Тр. Междунар. науч.-практ. конф. «INTERMATIC-2004».— Москва.— 2004.— С. 54—56.

12. Белянин А. Ф., Самойлович М. И., Александров Д. В. и др. Многослойные защитные покрытия термопечатающих матриц на основе AlN / Там же.— С. 50—53.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ



**КОНТРАКТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО
ЭЛЕКТРОНИКИ**

1 декабря 2005 г., Москва, конференц-центр «Экстрополис»

Уважаемые господа, приглашаем Вас принять участие во второй Всероссийской конференции «Контрактное производство электроники в России». За два года рынок контрактного производства в России качественно изменился, и если первая конференция проходила во время зарождения рынка, то к настоящему времени определились позиционирование и стратегия участников рынка, сформировались бизнес-альянсы, конкурентные противостояния. Мы приглашаем Вас обсудить новые возможности и проблемы рынка контрактного производства электроники, обменяться опытом с коллегами и партнерами, вместе с ведущими контрактными производителями России обсудить реализацию перспективных проектов.

Иван Покровский, директор ИД "Электроника"

ОРГКОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ: тел/факс: (095) 741-7701; 741-7702; e-mail: conf@ecomp.ru; www.elcp.ru

Д. т. н. В. В. БАРАНОВ

Республика Беларусь, г. Минск, Белорусский
гос. ун-т информатики и радиоэлектроники
E-mail: vvb@bsuir.unibel.by

Дата поступления в редакцию
11.04 2005 г.

Оппонент к. ф.-м. н. Н. С. БОЛТОВЕЦ
(НИИ "Орион", г. Киев)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ МОП-СТРУКТУР С МАЛЫМИ ПРОЕКТНЫМИ НОРМАМИ

Показаны возможности повышения технологичности МОП-транзисторов, а также создания ДМОП-транзисторов с вертикальной структурой, перспективной для мощных полупроводниковых приборов.

Как известно, для интегральных схем большой степени интеграции (БИС) и средней степени интеграции (СИС) на базе МОП-структур характерны следующие функциональные и потребительские особенности: высокая плотность элементов, малая мощность рассеяния, высокая помехоустойчивость и низкая стоимость. Основное применение МОП БИС и СИС — микропроцессоры и ЗУ.

По технологии МОП-структур в составе БИС и СИС их можно разделить на три класса:

- с каналом *n*-типа;
- с каналом *p*-типа;
- комплементарные МОП БИС (в них между источником питания и корпусом последовательно включены МОП-транзисторы с каналами *p*- и *n*-типа, располагаемые в электрически изолированных от остальных участков пластины областях, называемых карманами,).

Основными задачами настоящего исследования явились: анализ физико-технологических ограничений при формировании твердотельной структуры

МОП-транзисторов и обоснование технологических методов, обеспечивающих создание структур с малыми проектными нормами для БИС, а также для дискретных, в том числе мощных, полупроводниковых приборов.

Одним из перспективных процессов создания изоляции карманов в технологии БИС является так называемый LOCOS-процесс, получивший наибольшее применение в технологии МОП БИС [1, с. 194]. Процесс основан на локальном окислении кремниевых пластин (100) через маску Si_3N_4 (рис. 1), позволяет частично планаризовать рельеф кристалла, что, в свою очередь, дает возможность:

- уменьшить вероятность разрыва токоведущих дорожек на ступеньках сложного рельефа кристалла БИС;
- повысить пороговое напряжение «паразитных» транзисторов путем увеличения толщины SiO_2 ;
- увеличить плотность размещения элементов на кристалле.

Вследствие малой толщины диэлектрика (SiO_2) под затвором ($\approx 300\text{...}400 \text{ \AA}$) в современных твердотельных структурах образуются несколько паразитных емкостей, ограничивающих частотные свойства вентилей на их основе [2, с. 352].

В LOCOS-процессе особое значение имеет операция синтеза Si_3N_4 . Одним из прогрессивных методов синтеза Si_3N_4 является метод, основанный на использовании реакторов низкого давления. В качестве реагентов используются хлорсиланы и аммиак. Этим

методом могут быть получены пленки Si_3N_4 с высокой однородностью по толщине (на уровне $\pm 2,5\%$). По производительности и себестоимости процесс синтеза Si_3N_4 приближается к окислительно-диффузионным процессам планарной технологии. Скорость роста Si_3N_4 при температуре $T=850\text{...}900^\circ\text{C}$ составляет $\approx 10\text{...}20 \text{ \AA}/\text{с}$.

Следует отметить, что в процессе формирования твердотельных структур размеры областей, например проводящего канала МОП-транзистора, могут изменяться по отноше-

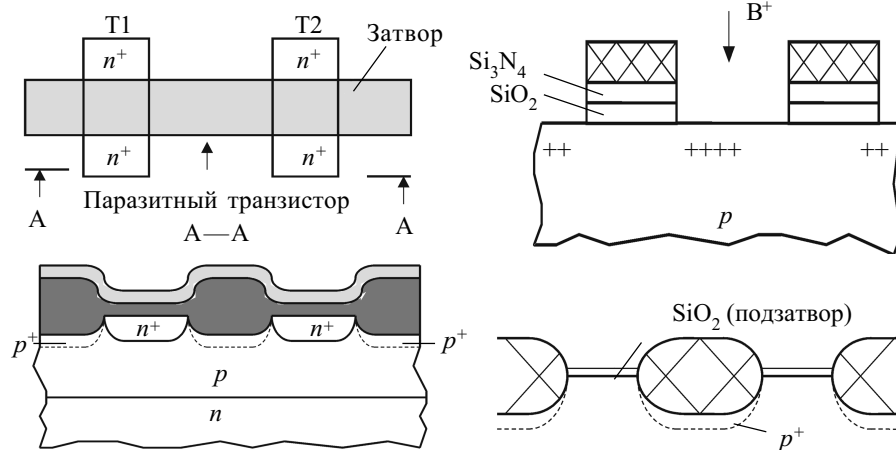


Рис. 1. Стадии процесса создания локальной изоляции МОП-структур в составе БИС (LOCOS-процесс), поясняющие образование некоторой непланарности рельефа

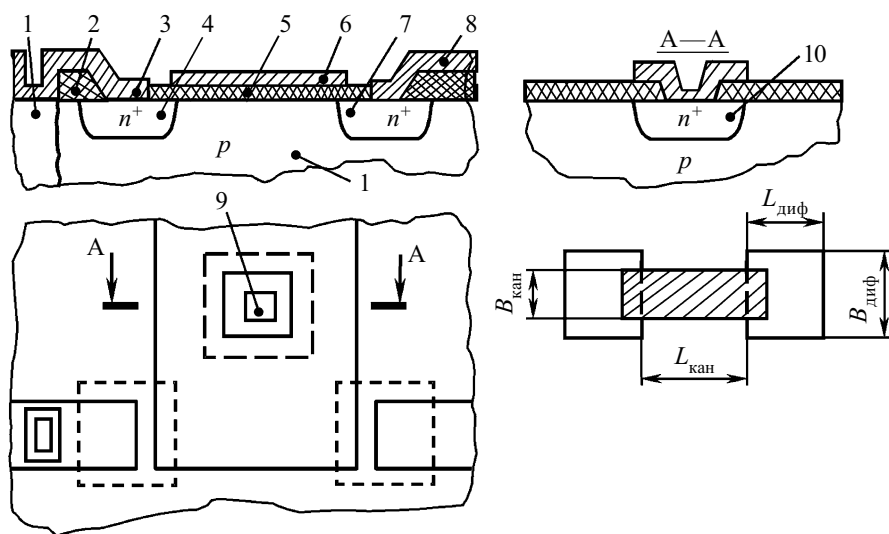


Рис. 2. Фрагмент твердотельной структуры МОП-транзистора: 1 — кремниевая подложка p -типа; 2 — относительно толстый слой SiO_2 (пассивирующий диэлектрик); 3, 8 — металлизация истока и стока, соответственно; 4, 7 — диффузионные n -области истока и стока; 5 — тонкий слой SiO_2 (подзатворный диэлектрик); 6 — затвор; 9 — защитный диод; 10 — n -область защитного диода; $L_{\text{диф}}$, $B_{\text{диф}}$ — топологические размеры областей истока и стока, формируемых диффузией или ионной имплантацией

нию к размерам, задаваемым фотошаблоном. Данное положение иллюстрируется **рис. 2**.

Действительно, под материалом затвора находится относительно тонкий слой оксида кремния $d_{\text{SiO}_2} = 0,03 \dots 0,1$ мкм. За пределами активных областей МОП-транзистора Si -подложка покрыта относительно толстым слоем SiO_2 ($d_{\text{SiO}_2} = 0,8 \dots 1,2$ мкм). Такое отличие в толщине оксидных слоев обусловлено задачами уменьшения паразитной емкости сигнальных шин, снижения брака из-за проколов в оксиде, повышения порогового напряжения паразитных транзисторов.

Топология МОП-транзистора в процессе изготовления схемы изменяется в соответствии со значениями, указанными ниже:

$$L_{\text{кан}} = L_{\text{кан}} - 2x_{\text{ф}} - 1,6x_{p-n}; \quad B_{\text{кан}} = B_{\text{кант}} + 2x_{\text{ф}},$$

где $L_{\text{кан}}$, $B_{\text{кан}}$ — реальные значения длины и ширины области канала на пластине;

$L_{\text{кант}}$, $B_{\text{кант}}$ — топологические размеры канала, задаваемые фотошаблоном;

$x_{\text{ф}}$ — изменение размера на операциях фотолитографии и травления;

x_{p-n} — глубина p - n -перехода диффузионных областей стока и истока ($0,8x_{p-n}$ — глубина боковой диффузии).

Длина затвора делается несколько большей, чем длина промежутка "исток-сток", для уверенного формирования канала по длине всего этого промежутка. При этом в областях взаимного перекрытия $l_{\text{пер}}$ затвора с истоком и стоком образуются паразитные емкости $C_{\text{зи}}$ и $C_{\text{зс}}$. Наибольшее влияние на быстродействие прибора оказывает переходная емкость $C_{\text{зс}}$, которая играет роль элемента параллельной обратной связи в транзисторном инверторе.

Для уменьшения емкостей $C_{\text{зи}}$ и $C_{\text{зс}}$ используются конструкции с самосовмещенным затвором относительно внутренних границ истока и стока. В таких структурах затворы изготавливают из поликристаллического кремния (ПКК), тугоплавких металлов, например Mo , или силицидов на их основе, например MoSi_2 , TiSi_2 и др. ПКК, Mo , MoSi_2 , TiSi_2 — это высокотемпературные материалы, способные при определенных технологических условиях выполнять

функции защитной маски при диффузии ($T > 1100^\circ\text{C}$) или ионной имплантации примесей. В этом случае диффузия примесей в Si ограничена со стороны затвора слоем ПКК, Mo , MoSi_2 или TiSi_2 . Длина диффузионной области под затвором определяется толщиной диффузионного слоя. Относительно малый уход примесей под край затвора имеет место при ионном легировании.

Характерные структуры МОП-транзисторов с ПКК- и Mo -затворами показаны на **рис. 3, 4**.

МОП-транзисторы с самосовмещенными затворами имеют следующие преимущества по сравнению с традиционными затворами, например из Al :

- более высокое быстродействие;
- малые размеры, что позволяет повысить плотность компоновки и процент выхода годных БИС;
- низкие пороговые напряжения, что позволяет снизить напряжение питания, потребляемую мощность, повысить быстродействие БИС;
- сочетать биполярные и МОП-транзисторы на одном кристалле.

Вместе с тем формирование таких структур сопряжено с целым рядом физико-химических ограничений, которые необходимо учитывать в технологическом маршруте и при проведении отдельных опера-

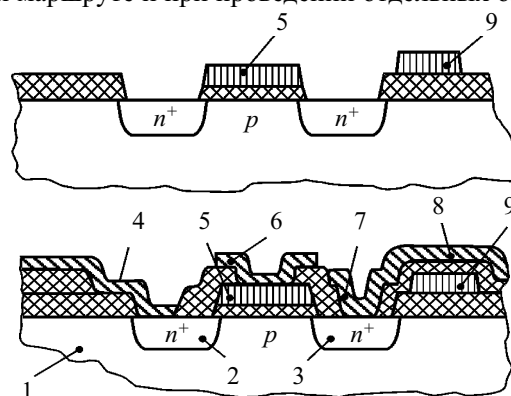


Рис. 3. Структура МОП-транзистора с ПКК-затвором: 1 — подложка p -типа; 2, 3 — области стока и истока; 4, 6, 7 — Al -выводы от областей истока, стока и затвора; 5 — ПКК-затвор; 8 — Al -шина (2-й уровень разводки); 9 — поликремниевая сигнальная шина (1-й уровень разводки)

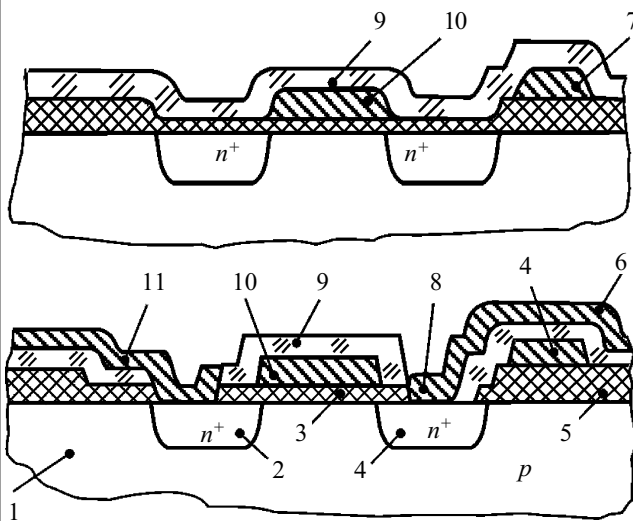


Рис. 4. Структура МОП-транзистора с затвором из тугоплавкого металла (*Me*), например *Mo*:
 1 — подложка; 2, 4 — области стока и истока; 3, 5 — тонкий и толстый слой SiO_2 ; 6 — *Al*-шина (2-й уровень разводки); 7 — *Me*-шина (1-й уровень разводки); 8, 11 — *Al*-выводы истока и стока; 9 — боросиликатное стекло; 10 — *Me*-затвор

ций. Связано это, главным образом, с кинетикой роста фаз силицидов по механизму твердофазных реакций *Si* с переходным металлом при термообработках.

С целью самосовмещения областей истока и стока по отношению к затвору из ПКК и снижения удельного сопротивления пленки затвора (что важно для словарных шин большой протяженности в цифровых МОП БИС) на структуру (со вскрытыми областями истока и стока, а также со сформированным топологическим рисунком затвора из ПКК на поверхности относительно тонкого слоя SiO_2) наносят пленку переходного металла, например *Ti*, и проводят высокотемпературную термообработку. Образующаяся в областях контакта с кремнием в результате твердофазной реакции новая фаза силицида титана труднорастворима во многих реактивах на основе кислот, в которых, однако, хорошо растворяется исходный металл [3, с. 68, 69]. Это обстоятельство используют при удалении травлением остатков непрореагировавшего металла, в том числе на участках, где металлическая пленка расположена на слое SiO_2 , включая слои, отделяющие области стока и истока от затвора из ПКК.

Исследование процессов формирования самосовмещенных пленочных структур на основе имеющего низкое удельное сопротивление дисилицида титана по методу твердофазных реакций с помощью модуля ИК-излучения, встроенного в вакуумную установку и позволяющего проводить импульсную термообработку *in situ*, показало, что на границе раздела *Si/Ti* возможно образование двух фаз — TiSi_2 и Ti_5Si_3 [4]. При этом также следует учитывать «боковой рост» силицида, что ограничивает возможности формирования структур с минимальными проектными нормами.

Как технологический метод существенного подавления бокового роста пленки силицида в [5] предложено использовать отжиг в среде азота при пониженном давлении (порядка 0,26 Па). Метод основан на

том, что насыщенный азотом металл обладает пониженной скоростью образования силицида при взаимодействии с кремнием [3, с. 105]. Это позволяет повысить технологичность МОП-структур и имеет важное практическое значение при формировании затворов КМОП БИС (например в словарной шине микронной ширины).

При поиске оптимальных технологических режимов проведения процессов термообработки следует, однако, учитывать возможное перераспределение примеси в зоне срастания «пленка—подложка». При этом полагается, что кинетика роста синтезируемой фазы на границе раздела описывается параболическим законом, если процесс ограничивается диффузией компонентов, и линейным законом — если ограничивающим фактором является скорость химических реакций образования нового соединения.

Толщина образующихся слоев x_i как функция времени t в процессе изотермического отжига оценивается из уравнений $x_i^2 = Ut$, $x_i = Vt$, где U и V — параболическая и линейная скорости, представляемые в арениусовской аппроксимации с соответствующими множителями U_0 , V_0 и энергией активации E_a . Выбор одного из уравнений определяется температурной областью, в которой проводится термообработка, и некоторыми другими параметрами процесса.

Для определения толщины указанных выше слоев в [6] получены аналитические выражения для случая импульсного отжига структур, а на примере контактной пары *Si/Ti* изучены основные закономерности процесса образования силицидов в переходном слое при проведении импульсного отжига. Одно из основных отличий такой технологии термообработки по сравнению с процессом изотермического отжига заключается в смещении температурного интервала, при котором совместно сосуществуют несколько фаз, в более высокотемпературную область.

В частности, показано, что однофазный состав переходного слоя TiSi_2 может быть получен при секундной ИК-термообработке лишь при достижении температуры на поверхности пленок порядка 800°C и выше. Использование исходных пленок *Ti* толщиной более 0,1 мкм приводит к тому, что фазовые превращения после проведения импульсного ИК-отжига остаются незавершенными даже при достижении температур 700–750°C. Полученные нами количественные результаты характеризуют кинетические закономерности процесса образования силицидов в переходном слое контактных структур в процессах изотермической термообработки и импульсного отжига при воздействии плотных потоков ИК-излучения.

Еще более значительного снижения величины $E_{сз}$ удастся достигнуть при использовании твердотельных структур типа V-МОП и ДМОП. Первая показана на рис. 5, а структура планарно-эпитаксиального ДМОП-транзистора в составе БИС имеет вид, показанный на рис. 6.

При изготовлении V-МОП-транзисторов используют V-каналы (V-образные канавки) в полупроводниковой подложке, поверхность которых покрыта слоем диоксида кремния. Длина канала $L_{\text{кан}}$ определяется толщиной эпитаксиальной пленки *p*-типа. Зат-

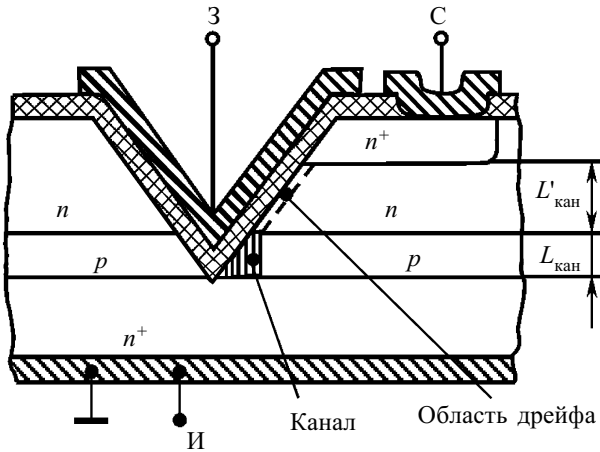


Рис. 5. Структура V-МОП-транзистора

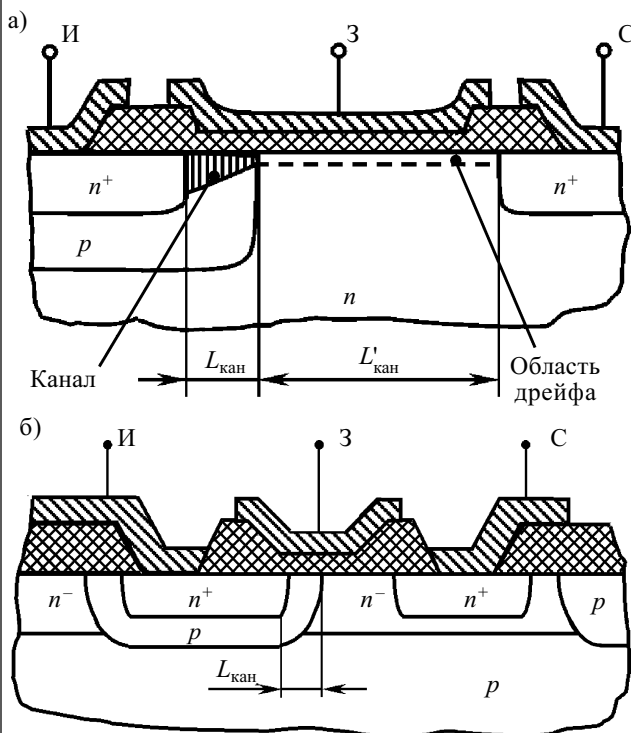


Рис. 6. Фрагмент в области затвора (а) и полная структура (б) ДМОП-транзистора в составе БИС

вор V-МОП-транзистора расположен в V-канале, покрытом тонкой пленкой SiO₂. V-МОП-транзисторы имеют высокую крутизну и быстродействие, занимают малую площадь на поверхности подложки (благодаря использованию вертикальной конструкции). В БИС все V-МОП-транзисторы имеют общий исток, роль которого выполняет подложка n⁺-типа.

В твердотельной структуре ДМОП-транзистора область p-типа и область истока n⁺-типа формируются двойной диффузией акцепторной и донорной примеси в одно и то же окно окисной пленки. Процесс основан на том, что скорость диффузии в кремнии примеси p-типа, например бора, выше, чем примеси n-типа, например фосфора [7, с. 70]. Толщина p-области практически равна толщине базы биполярного транзистора ($L_{\text{кан}}=0,4...2$ мкм), что иллюстрируется рис. 6, а.

Активная область канала с длиной $L_{\text{кан}}$ образуется из границы раздела p-области и подзатворного оксида. При нормальных смещениях электроны инжектируются из короткого канала в пристокковую область пространственного разряда и из-за дрейфа в электрическом поле переносятся в n⁺-область стока.

Отличительной особенностью ДМОП-транзистора является то, что затвор не совмещается с n⁺-областью стока. Поэтому такая конструкция имеет малую емкость $C_{\text{зс}}$ и высокое рабочее напряжение. Короткий канал и малая величина $C_{\text{зс}}$ позволяют увеличить быстродействие БИС на ДМОП-транзисторах приблизительно в 5 раз при технологических ограничениях, характерных для БИС и СИС на обычных МОП-транзисторах.

Рассмотренные планарные твердотельные структуры МОП-транзисторов могут (при необходимости) трансформироваться в такие, у которых области истока и стока располагаются вертикально. Тогда при получении областей, расположенных на планарной стороне кристалла, например области истока, можно использовать имеющиеся для рассмотренных МОП-структур подходы проектирования, тестирования и контроля, а также базовые технологические процессы их формирования [6]. В то же время технологические процессы формирования области стока на непланарной стороне кристалла могут быть заимствованы из арсенала технологии дискретных полупроводниковых приборов, таких как биполярные транзисторы, мощные диоды Шоттки и др. Эти процессы, однако, отличаются использованием повышенных температур, например, напайки кристаллов на основание корпуса или выводную рамку, а это означает необходимость адаптации процессов формирования планарных областей и оптимизации характеристик кристаллов МОП-транзисторов с вертикальной структурой с учетом изменения их физико-топологических характеристик, как это было показано выше.

ДМОП-транзисторы с вертикальной структурой, как правило, относятся к классу мощных приборов. Поэтому можно констатировать, что для формирования твердотельных структур мощных приборов, в принципе, могут быть использованы те технологические методы, которые получили применение при изготовлении маломощных изделий полупроводниковой электроники (цифровых БИС и СИС), если провести адаптацию этих методов к данным структурам. Разумеется, чтобы получить параметры мощных ДМОП-транзисторов на уровне, позволяющем конкурировать на мировых рынках с продукцией мировых лидеров по производству приборов силовой электроники, необходимо также оптимизировать физико-топологические характеристики таких твердотельных структур и условия реализации технологических методов, заимствованных из технологии БИС.

Исследовательские работы в данном направлении являются перспективными, поскольку в технологии мощных ДМОП-транзисторов достижение предельно малых топологических размеров не является критичным, что позволяет использовать в их производстве имеющееся литографическое оборудование под проектные нормы на уровне 1 мкм.

В Беларуси эти работы проводятся в НПО «Интеграл» и в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники — в частности, силами таких специалистов как Л. П. Ануфриев, И. И. Рубцевич, П. М. Шишло, А. М. Алиев, М. М. Кречко. Полученные результаты позволили в последние годы разработать и освоить производство серии мощных *n*-канальных ДМОП-транзисторов, например КП732, КП728, КП750 и др.

Выводы

На основе проведенного анализа физико-технологических ограничений при создании твердотельных структур МОП-транзисторов показаны возможности повышения их технологичности на основе самосовмещенной технологии, в том числе при использовании твердофазных реакций тугоплавких переходных металлов с кремнием, протекающих в условиях изотермической и импульсной термообработки, а также создания ДМОП-транзисторов с вертикальной струк-

турой, перспективной для мощных полупроводниковых приборов.

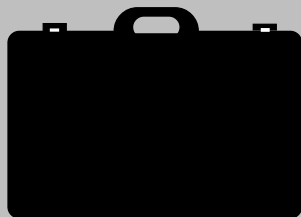
ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники. — М.: Лаборатория базовых знаний, 2003.
2. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов / Под ред. Р. А. Сурица. — М.: Радио и связь, 1988.
3. Мюрарка Ш. Силициды для СБИС. — М.: Мир, 1986.
4. Баранов В. В. Материалы и процессы формирования самосовмещенных пленочных структур изделий твердотельной электроники и микроэлектроники // Докл. Белорус. гос. ун-та информатики и радиоэлектроники. — 2004. — № 3. — С. 102—117.
5. Baranow W. W., Sawilow A. W., Miljaew W. A., Schirkow A. W. Selektive bildung von titandisilizidchichten unter anwendung des stufenformigen tempers // IHR 32 Int. Wissenschaft-liches Kolloquium. — Immenau, DDR. — 1987. — В 32. — S. L15—L18.
6. Баранов В. В., Костюкевич А. А. Исследование процесса селективного формирования пленок силицидов титана в структурах СБИС // Изв. Белорус. инженерной академии. — 2003. — № 1(15)/4. — С. 92—94.
7. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 2. — М.: Мир, 1984.

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

- Основные положения и задачи государственной программы развития техники и технологий сверхвысоких частот на 2005—2009 годы в Украине. (Украина, г. Киев)
- Разработка программно-аппаратных средств для кодирования и декодирования кодов Рида-Соломона на основе вычисления особых продолжений ганкелевых (теплицевых) матриц и синдромов. (Россия, г. С.-Петербург)
- Зависимость теплопроводности диодного кристалла от ориентации *p-n*-перехода. (Украина, г. Киев)
- Оптоэлектронный датчик пересечения плоскости движущимися телами. (Украина, г. Черновцы)
- Выращивание крупногабаритных монокристаллов вольфрамата кадмия с высокой оптической однородностью. (Украина, г. Львов)
- Автоматизированные системы распознавания образов на основе многоуровневой оптической памяти. (Украина, г. Донецк)
- Обработка сигнала в многофункциональных сенсорах на основе твердых растворов $Si_{1-x}Ge_x$. (Украина, г. Львов)
- Автоматизация фотометрического контроля скорости травления тонких диэлектрических пленок. (Россия, г. Рыбинск)
- Разработка и создание низкотемпературных наноэлектронных устройств для регистрации сигналов сверхвысоких частот и измерение их параметров. (Украина, г. Киев)
- Проблема прочности в радиоэлектронике и работы хмельницких ученых. (Украина, г. Хмельницкий)
- Теоретический подход к моделированию кинетических процессов формирования газовой фазы методом химических газотранспортных реакций. (Украина, г. Львов)
- Пассивная локация движущегося транспорта для автоматической регулировки транспортных потоков в условиях современного города. (Украина, г. Киев)
- СВЧ-плазмохимическое осаждение планарных волноводных структур на основе кварцевого стекла, легированного фтором. (Россия, г. Фрязино)
- Создание высокостабильных источников напряжения на основе Джоузефсоновских сверхпроводниковых решеток. (Украина, г. Киев; Германия, г. Брауншвейг)
- Газочувствительные поверхностно-барьерные структуры "силицид кобальта-пористый кремний-кремний". (Украина, г. Киев)
- Осветительный канал цифрового оптического микроскопа на базе диффузного излучателя. (Украина, г. Киев)



в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

Д. ф.-м. н. З. Д. КОВАЛЮК, к. ф.-м. н. В. Н. КАТЕРИНЧУК,
О. А. ПОЛИТАНСКАЯ, О. Н. СИДОР

Украина, Черновицкое отделение Института проблем
материаловедения им. И. Н. Францевича
E-mail: chimsp@unicom.cv.ua

Дата поступления в редакцию
07.06 2005 г.

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

ВЛИЯНИЕ γ -ОБЛУЧЕНИЯ НА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ InSe-ГЕТЕРОСТРУКТУР

Исследования гетероструктур $p-n$ -InSe и окисел- p -InSe после облучения в дозах 10—300 Р показали, что InSe-диоды отвечают требованиям радиационной стойкости.

Важной задачей полупроводникового материаловедения является не только поиск радиационноустойчивых материалов, но и изучение поведения устройств на их основе при работе в условиях жестких излучений.

В качестве основы многих гетероструктур используются подложки InSe [1—4], т. к. слоистая структура кристаллов InSe позволяет легко получать качественные подложки произвольной толщины путем скалывания их со слитка без дополнительных обработок поверхности [5].

Хорошо известно, что на характеристики селенида индия практически не влияют даже значительные дозы облучения [6, 7]. Однако вопросу радиационной стойкости фотоэлектронных устройств на его основе уделено значительно меньше внимания.

В настоящей работе исследовано влияние γ -облучения на фотоэлектрические характеристики фотодиодов $p-n$ -InSe и окисел- p -InSe.

Кристаллы InSe n - и p -типа проводимости выращивались вертикальным методом Бриджмена. Более однородные слитки этих кристаллов получались при незначительном надстехиометрическом избытке In над Se в соотношении $In_{1,03}Se_{0,97}$. Специально легированный InSe имел всегда n -тип проводимости, а легированный кадмием в количестве 0,1 мас. % — p -тип.

Для создания гетероструктур (ГС) $p-n$ -InSe использовался метод оптического контакта полупроводников [8]. В качестве фронтального полупроводника использовались тонкие (20—30 мкм) пластины n -InSe, в качестве базового — p -InSe. Электропроводность пластин была на два порядка выше, чем кристаллов p -типа проводимости (10^3 — 10^4 Ом $^{-1}$ ·см $^{-1}$).

Гетероструктуры окисел- p -InSe изготавливались термическим окислением подложки из p -InSe при температуре 400—450°C [4]. В качестве токовых контактов использовался чистый индий. Площадь изготовленных образцов составляла 0,25 см 2 .

Облучение проводилось от источника непрерывного действия γ -квантами ^{60}Co ($E=1,25$ МэВ) дозами 10 и 300 Р при комнатной температуре.

Спектры фоточувствительности ГС исследовались с помощью монохроматора МДР-3 с разрешающей способностью 2,6 нм/мм. Все спектры нормировались относительно количества падающих фотонов.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) гетероструктур исследовались на установке „Schlumberger SI 1255” с компьютерным интерфейсом. Все измерения проводились при комнатной температуре.

Результаты измерений фотоэлектрических параметров гетероструктур до и после облучения приведены в **таблице**.

| Гетероструктура | D, P | U_{xx}, B | $J_{кз}, mA/cm^2$ |
|-------------------|--------|-------------|-------------------|
| $p-n$ -InSe | 0 | 0,4 | 0,12 |
| | 10 | 0,44 | 0,24 |
| | 300 | 0,52 | 2,16 |
| Окисел- p -InSe | 0 | 0,47 | 2,9 |
| | 10 | 0,51 | 5,0 |
| | 300 | 0,545 | 8,5 |

Из таблицы видно, что с увеличением дозы облучения D наблюдается четкая тенденция к улучшению характеристик ГС. Максимальная величина роста напряжения холостого хода U_{xx} для ГС $p-n$ -InSe составляет 30%, а тока короткого замыкания $J_{кз}$ — 1700%. Для ГС окисел- p -InSe U_{xx} увеличивается на 15% при росте $J_{кз}$ на 200%.

На **рис. 1** показаны зависимости квантовой эффективности фототока η исследуемых ГС от энергии падающего излучения.

Для $p-n$ -InSe (рис. 1, *a*) в длинноволновой части спектра заметен острый пик, соответствующий экситонному поглощению InSe [9]. Облучение порядка 10 Р практически не влияет на этот пик, а увеличение дозы до 300 Р приводит к его исчезновению. Известно, что в несовершенных кристаллах экситонное поглощение не наблюдается. В нашем случае к аналогичному результату приводит образование радиационных дефектов.

Форма спектров относительной квантовой эффективности фототока гетероструктур окисел- p -InSe (рис. 1, *b*) после γ -облучения практически не изменяется, т. е. используемые дозы облучения не приводят к разрушению потенциального барьера или к существенному изменению фототока.

Для обеих рассматриваемых структур в коротковолновой спектральной области характерен спад фоточувствительности, который обычно связывают с поверхностными состояниями и увеличением скорости поверхностной рекомбинации [10].

На ВАХ гетероструктур $p-n$ -InSe и окисел- p -InSe (**рис. 2**) после γ -облучения наблюдается увеличение коэффициента выпрямления тока. Наблюдаемые после облучения образцов изменения экспоненциальной

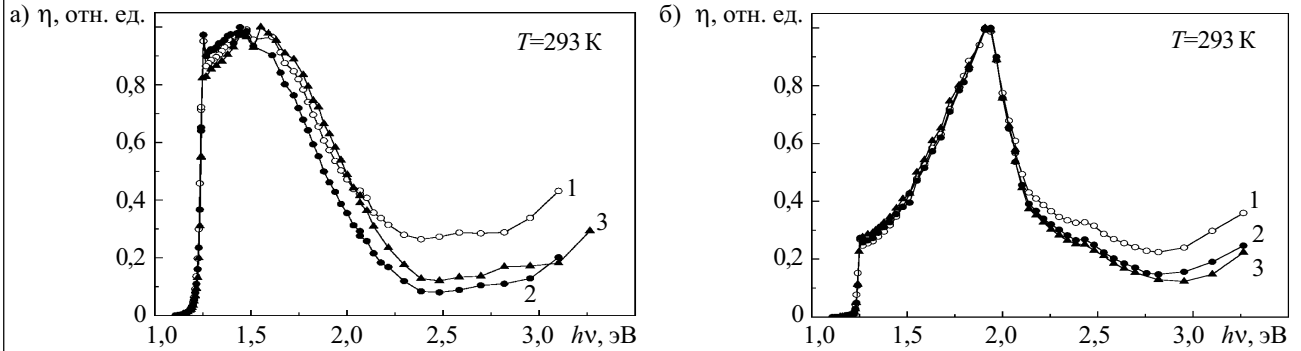


Рис. 1. Спектры квантовой эффективности фототока для ГС $p-n$ -InSe (а) и окисел- p -InSe (б): 1 — до γ -облучения; 2 — $D=10$ P; 3 — $D=300$ P

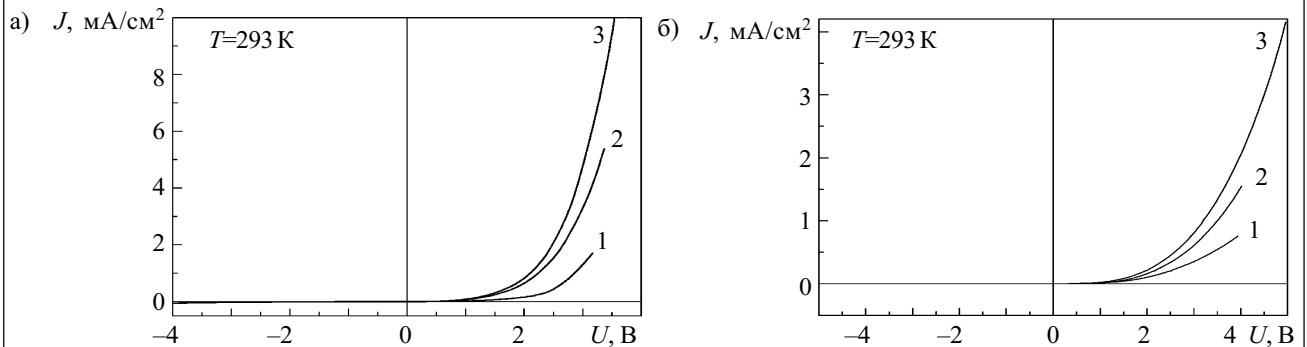


Рис. 2. ВАХ гетероструктур $p-n$ -InSe (а) и окисел- p -InSe (б): 1 — до γ -облучения; 2 — $D=10$ P; 3 — $D=300$ P

зависимости тока от напряжения и рост U_{xx} могут быть вызваны двумя факторами — ростом высоты потенциального барьера и увеличением проводимости базы гетероструктур.

Качественная физическая модель, которая объясняет эти изменения, базируется на зонной энергетической диаграмме гетероструктур и учитывает смещение уровня Ферми в полупроводниках после γ -облучения. Действие высокоэнергетических квантов приводит к образованию дефектов акцепторного типа. Холловские измерения концентрации основных носителей заряда в p -InSe подтверждают ее увеличение более чем на порядок после облучения. В случае увеличения концентрации акцептуров происходит смещение уровня Ферми в контактирующих полупроводниках и, соответственно, увеличение контактной разности потенциалов.

Проведенные исследования характеристик InSe-гетероструктур показали, что воздействие γ -радиации в дозах 10—300 P приводит к увеличению значений коэффициента выпрямления тока, напряжения холостого хода и тока короткого замыкания и практически не влияет на спектральное распределение фотоответа.

Несмотря на то, что проникающее излучение приводит к образованию в базовом материале дефектов акцепторного типа, деструктивного влияния на границу $p-n$ -перехода зафиксировано не было.

Исходя из полученных результатов можно предложить непосредственное использование гетероструктур на основе InSe в качестве радиационноустойчивых фотодетекторов. Кроме того, исследованные фото-

диоды как базовые элементы могут входить в структуру других электронных устройств, которые применяются для радиационного контроля.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Бакуменко В. Л., Ковалюк З. Д., Курбатов Л. Н. и др. Исследование гетеропереходов InSe-GaSe, приготовленных посадкой на оптический контакт. I. Электрические характеристики неосвоенных переходов // ФТП.— 1980.— Т. 14.— № 6.— С. 1115—1119.
2. Di Giulio M., Micocci G., Rizzo A, Tepore A. Photovoltaic effect in gold-indium selenide Schottky barriers // J. Appl. Phys.— 1983.— Vol. 54.— P. 5839—5843.
3. Martinez-Pastor J., Segura A., Valdes J.L., Chevy A. Electrical and photovoltaic properties of indium-tin-oxide/ p -InSe/Au solar cells // Ibid.— 1987.— Vol. 62.— P. 1477—1483.
4. Катеринчук В. Н., Ковалюк М. З. Гетеропереходы из InSe, сформированные термическим окислением кристаллической подложки // Письма в ЖТФ.— 1992.— Т. 18, № 12.— С. 70—72.
5. Ананьина Д. Б., Бакуменко В. Л., Курбатов Л. Н., Чишко В. Ф. Об особенностях фотопроводимости в области сильного поглощения полупроводниковых материалов слоистой и дефектной структурами // ФТП.— 1976.— Т. 10, № 12.— С. 2373—2375.
6. Алиев Р. Ю., Аскеров К. А. Влияние ионизирующих излучений на основные параметры фотодиодов на основе селенида индия // Прикладная физика.— 1999.— № 3.— С. 78—81.
7. Аскеров К. А., Абазова А. З., Исаев Ф. К. Влияние проникающих излучений на спектральные характеристики селенида индия, легированного серебром и германием // Там же.— 2004.— № 4.— С. 94—96.
8. Бакуменко В. Л., Чишко В. Ф. Электрические свойства оптических контактов слоистых полупроводников // ФТП.— 1977.— Т. 11, № 10.— С. 2000—2002.
9. Катеринчук В. Н., Ковалюк М. З. $P-n$ -гомогенные InSe-фотодиоды // Там же.— 1991.— Т. 25, № 11.— С. 954—957.
10. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. Кн 2.— М.: Мир, 1984.

М. И. ГОЛОВКО, Ю. В. ГОНЧАРЕНКО, В. Н. ГОРОБЕЦ, С. М. ЗОТОВ,
д. ф.-м. н. Ф. В. КИВВА, к. ф.-м. н. В. Г. ГУТНИК, А. И. ГОВОРИЩЕВ

Украина, г. Харьков, Ин-т радиофизики и электроники,
Радиоастрономический ин-т, НПФ «Сетра ЛТД»
E-mail: gutnik@rian.kharkov.ua

Дата поступления в редакцию
25.05 2005 г.

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

УСТАНОВКА ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦИИ СОРБЕНТОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

Рассмотрен вопрос применения технологии объемного нагрева сорбента в электромагнитном поле высокой частоты и предложена установка для промышленной регенерации сорбентов.

В энергетической промышленности в больших количествах используется трансформаторное масло. В процессе эксплуатации в масло попадают различного рода примеси и образуются продукты старения, снижающие его эксплуатационные характеристики и подлежащие удалению. Одной из наиболее опасных примесей в трансформаторном масле является вода, поглощаемая маслом из атмосферы.

Для осушки различных газов и жидкостей, включая трансформаторное масло, широко применяется процесс адсорбции. Удаление (адсорбция) воды (адсорбата) из масла в процессе его эксплуатации обычно осуществляется в адсорберах, заполненных поверхностно-активными веществами-сорбентами [1]. Выбор сорбентов зависит от конкретной задачи. Для удаления воды применяются микропористые сорбенты, например цеолиты. Масло, проходя через адсорбер, заполненный сорбентом, обезвоживается до тех пор, пока у сорбента не наступит фаза насыщения влагой. При этом необходимо либо заменить сорбент, либо регенерировать его.

Основной стадией регенерации является десорбция или удаление поглощаемого вещества (влаги) из сорбента [2]. Наиболее широкое применение в промышленности нашел метод термической десорбции с помощью специальных электронагревателей (ТЭНов), которые представляют собой линейно распределенные источники тепла. Передача тепла от них происходит за счет теплопроводности в системе "сорбент—масло", которая очень низка. Недостатками такого метода является либо большое время регенерации (более 30 ч), либо локальный перегрев вблизи поверхности ТЭНов, который приводит к коксованию сорбента.

Целью настоящей работы является создание устройства для ускоренной регенерации сорбента в промышленных условиях.

Важно отметить, что время регенерации сорбента определяется скоростью его нагрева. С одной стороны, для увеличения скорости нагрева требуется увеличение мощности нагрева, с другой — для приме-

няемых в промышленности сорбентов скорость нагрева не должна превышать 5—6°С/мин [3]. Кроме того, качество регенерации сорбента определяется неизменностью необходимой температуры во всем объеме адсорбера.

Из этого следует, что при термической регенерации сорбента необходимо, как минимум, выполнить два условия — обеспечить оптимальную скорость нарастания температуры в адсорбере и создать равномерное температурное поле внутри всего объема адсорбера. Решить эту задачу можно применяя технологию объемного нагрева сорбента с помощью электромагнитного поля (ЭМП) в адсорбере.

Степень и скорость нагрева сорбента в ЭМП определяется его частотой и подводимой мощностью. Выбор рабочей частоты ЭМП осуществляется из условия необходимой глубины проникновения ЭМП в сорбент, которая зависит от комплексной диэлектрической проницаемости, а также от объема используемого адсорбера. (Обычно адсорберы имеют емкость от 10 до 100 дм³.)

Получение расчетных оценок рабочей частоты затруднено тем, что в литературе практически отсутствуют данные о комплексной диэлектрической проницаемости сорбентов. Предварительные эксперименты позволили получить некоторые данные, но они также показали, что диэлектрическая проницаемость сорбентов существенно зависит от частоты и изменяется в процессе регенерации. Тем не менее расчетные оценки на основе предварительных экспериментов с используемыми в промышленности сорбентами для адсорберов с указанными выше объемами позволили определить оптимальный диапазон значений рабочей частоты ЭМП — 10—30 МГц [4]. Исходя из требований по условиям безопасности для персонала и окружающей среды значение рабочей частоты было выбрано равным $f=13,56 \text{ МГц} \pm 0,05\%$.

Структурная схема устройства промышленной регенерации сорбента с помощью электромагнитного поля приведена на рис. 1 и включает в себя систему тепловой обработки сорбента (I) и вакуумно-гидравлическую систему (II). Система тепловой обработки сорбента состоит из генератора высокой частоты (ВЧ) 1 с блоком питания 2, согласующего устройства 3, нагрузки (адсорбера) 5 и блока управления 4. Вакуумно-гидравлическая система состоит из адсорбера 5, индикатора визуального контроля 8,

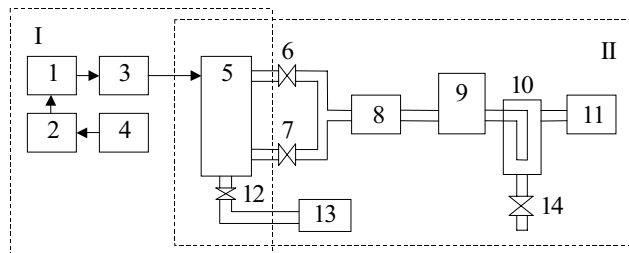


Рис. 1. Структурная схема устройства промышленной регенерации сорбента

теплообменника 9, сборника конденсата 10 и вакуумного насоса 11.

Принцип действия устройства состоит в следующем.

Энергия высокой частоты от генератора через коаксиальную линию поступает в адсорбер, который представляет для генератора ВЧ комплексную нагрузку. В результате испарения и удаления влаги из адсорбера диэлектрические свойства сорбента в процессе регенерации меняются, а следовательно, меняются и параметры нагрузки. Это требует периодической подстройки (согласования) выхода генератора и нагрузки с помощью устройства 3, позволяющего согласовывать меняющийся импеданс сорбента.

Пары влаги, выделяющиеся в результате регенерации сорбента, удаляются из верхней и нижней частей адсорбера через вентили 6 и 7. Жидкое масло, выделяемое в результате нагрева из сорбента, через вентиль 12 поступает в отстойник 13.

Для уменьшения температуры испарения воды и повышения эффективности регенерации в адсорбере создается вакуум (порядка 10000 Па) с помощью вакуумного насоса типа 2НВР-5ДМ. Пары влаги поступают в теплообменник 9, затем в сборник конденсата 10. Сконденсированная влага сливается из системы через вентиль 14.

Между адсорбером и теплообменником вмонтирован индикатор визуального контроля испарения 8. Управление мощностью генератора и контроль температуры внутри адсорбера осуществляются с помощью датчика температуры, вмонтированного в адсорбер. Кроме того, в конструкции адсорбера предусмотрены технологические измерители температуры, используемые для контроля температуры внутри адсорбера в процессе его наладки и эксплуатации.

Включение установки и контроль режимов ее работы осуществляются с помощью блока управления.

Генератор высокой частоты предназначен для генерации мощности ВЧ необходимой величины, передачи ее по кабелю через согласующее устройство в адсорбер. Генератор ВЧ имеет следующие технические характеристики:

| | |
|--------------------------------------|----------------------|
| максимальная выходная мощность | 1000 Вт |
| выходное сопротивление | 75 Ом |
| рабочая частота | 13,56 МГц |
| стабильность частоты, не хуже | 10^{-4} |
| диапазон ручной регулировки мощности | 100...1000 Вт |
| напряжение питания | 3 фазы, 380 В, 50 Гц |
| потребляемая мощность | ≤ 4 кВт |
| габаритные размеры генератора | 500×250×500 мм |
| габаритные размеры блока питания | 500×200×500 мм |
| масса генератора | ≤ 25 кг |
| масса блока питания | ≤ 60 кг. |

Функциональная схема генератора ВЧ приведена на рис. 2.

Задающий генератор 1 генерирует напряжение синусоидальной формы с частотой 13,56 МГц, которое подается на блок управления 2, где осуществляется его ручная регулировка перед подачей на вход усилителя мощности 3, что позволяет изменять ВЧ-мощность в адсорбере.

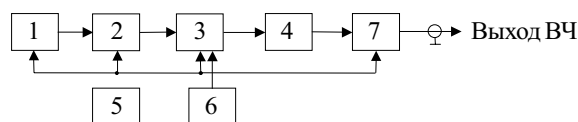


Рис. 2. Функциональная схема генератора ВЧ

Усилитель мощности выполнен на базе мощного генераторного тетрода ГУ-84Б с воздушным охлаждением. В анодную цепь тетрода включен П-контур 4, который обеспечивает согласование выхода генератора с коаксиальным кабелем (имеющим волновое сопротивление 75 Ом), а также точную настройку контура в резонанс на частоте 13,56 МГц.

Блок питания 5 обеспечивает необходимые напряжения постоянного тока для работы схем задающего генератора, блока управления, питания накала генераторной лампы и рефлектометра.

Для питания анода и экранной сетки лампы усилителя мощности используется высоковольтный выпрямитель 6, который обеспечивает получение напряжений +2000 В при токе нагрузки до 1 А и +300 В при токе нагрузки до 0,2 А. В случае превышения потребляемых токов по одной из цепей срабатывает устройство токовой защиты и отключает нагрузку. Кроме этого, в блоке питания имеется специальная блокировка, которая не позволяет включить генератор при отсутствии принудительного воздушного охлаждения выходной лампы усилителя мощности, а также автоматически отключает все источники питания при возникновении неисправностей в системе охлаждения и пропадании напряжения питания накала лампы.

Выходная мощность ВЧ-сигнала с выхода П-образного колебательного контура поступает на рефлектометр 7, который обеспечивает измерение и индикацию прямой и отраженной мощности, контролируя тем самым степень согласования выхода ВЧ-генератора с нагрузкой.

Конструктивно генератор ВЧ выполнен в виде двух блоков — высокочастотного устройства (собственно генератор) и блока питания.

Генератор высокой частоты подключается к адсорберу через согласующее устройство, которое предназначено для согласования выходного сопротивления генератора 75 Ом с входным сопротивлением адсорбера и представляет собой перестраиваемый Т-образный контур.

Основным элементом в устройстве регенерации сорбента является адсорбер вертикального типа (рис. 3), представляющий собой отрезок жесткой коаксиальной линии, разомкнутой на конце, которая заполняется сорбентом. Металлический цилиндр, выполненный из стальной трубы диаметром 250 мм и высотой 1000 мм, одновременно является внешним проводником 5 коаксиальной линии. Внут-

ри этой трубы по оси расположена труба меньшего диаметра, которая является центральным проводником 6. Для создания равномерного температурного поля к центральному проводнику прикреплены четыре металлических ребра 7. Центральный проводник устанавливается через керамический изолятор 9 на металлическую сетку 10. Верхний конец центрального стержня крепится ко дну согласующего устройства 2, которое одновременно является крышкой адсорбера. Согласующее устройство крепится к адсорберу через фланец 3.

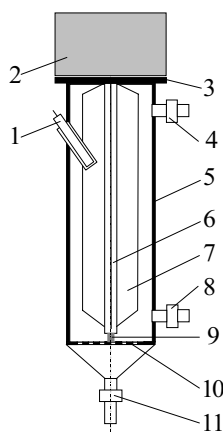


Рис. 3. Адсорбер

Удаление паров влаги в экспериментальном макете осуществляется через два вентиля — верхний 4 и нижний 8. Жидкое масло и влага, которые выделяются в процессе регенерации, удаляются через вентиль 11. Во внешней стенке адсорбера устанавливается термометр 1 типа РТ-3 для контроля температуры внутри адсорбера в процессе регенерации.

Заключение

Разработано, изготовлено и испытано устройство регенерации сорбента в электромагнитном поле, имеющее следующие эксплуатационные параметры:

- | | |
|--|--------------|
| 1. Масса одновременно регенерируемого сорбента | ≤ 50 кг. |
| 2. Максимально достижимая температура внутри адсорбера | ≤ 300°С. |
| 3. Градиент температуры в адсорбере: | |
| в радиальном направлении | ≤ 2°С/см; |
| по высоте | ≤ 0,2°С/см. |
| 4. Время регенерации | ≤ 8...10 ч. |
| 5. Количество циклов регенерации без замены сорбента | ≤ 10. |
| 6. Масса | 200 кг. |
| 7. Габариты | 1,5×1,5×1 м. |

По сравнению с существующими образцами предлагаемое устройство имеет следующие достоинства:

- обеспечение необходимой температуры с малыми градиентами во всем объеме регенерируемого сорбента;
- повышение скорости регенерации (по сравнению с нагреванием ТЭНами) в 1,5 — 3 раза;
- исключение необходимости механического перемешивания и пересыпания сорбента, приводящего к его разрушению;
- увеличение количества циклов регенерации сорбента без его замены, снижение удельных и общих затрат на регенерацию сорбента.

Основным достоинством описанного устройства является то обстоятельство, что в электромагнитном поле высокой частоты происходит объемный нагрев вещества, при котором минимизируется его деформация, а качественная сушка происходит быстрее и при меньших температурах и давлениях, что не приводит к разрушению нагреваемого вещества. Благодаря этому достоинству разработанное устройство может найти широкое применение в различных отраслях науки и промышленности, в частности в радиоэлектронике при изготовлении деталей и узлов из пластмасс и керамики, технология производства которых требует быстрого объемного неразрушающего нагрева.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кельцев Н. В. Основы адсорбционной техники.— М.: Химия, 1984.
2. Лукин В. Д., Анципович И. С. Регенерация адсорбентов.— Л.: Химия, 1983.
3. Головкин Г. А. Установка для производства инертных газов.— Л.: Машиностроение, 1974.
4. Кивва Ф. В., Горобец В. Н., Зотов С. М. и др. Новые технологии обработки сорбентов // Новини енергетики.— 2003.— № 1–2.— С. 26–31.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Медведев А. Технология производства печатных плат.— М.: Техносфера, 2005.— 360 с.

Монография содержит детальное изложение механических и электрохимических процессов производства печатных плат, включая бесстружечную обработку, лазерное сверление, очистку отверстий поверхностей, химическую и прямую металлизацию, финишные и контактные покрытия, а также изложение вопросов тестирования и технологического обеспечения надежности межсоединений.

Книга предназначена для профессиональных технологов, инженеров-разработчиков и практиков.

Баев Б. П. Микропроцессорные системы бытовой техники. Учебник для вузов.— М.: Горячая линия-Телеком, 2005.— 480 с., ил.

Излагаются основы микропроцессорной техники и различные подходы к проектированию микропроцессорных устройств на базе микропроцессоров и микроконтроллеров серий К580, К1816, К1807 и PIC170752, предназначенных для контроля и управления технологическими процессами. Рассматриваются способы программирования и отладки программного обеспечения для микропроцессорных систем на языках различного уровня.

Для студентов вузов сервисных специальностей; может быть полезна для специалистов, занимающихся разработкой микропроцессорных средств управления.



Р. В. РОГОВ, д. ф.-м. н. С. В. МЕЛЬНИЧУК,
к. ф.-м. н. Г. И. ВОРОБЕЦ

Украина, Черновицкий национальный университет им. Юрия Федьковича
E-mail: vgeorge@chnu.cv.ua

Дата поступления в редакцию
23.05 2005 г.

Оппонент к. т. н. Н. Т. КЛЮЧНИК
(ЦНИТИ "Техномаш", г. Москва)

СЕТЕВАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВЫРАЩИВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛОВ И ТОНКИХ ПЛЕНОК

Экспериментальное моделирование аппаратно-программного обеспечения показало достаточную надежность работы системы и значительное уменьшение трудоемкости контроля и управления параметрами технологического процесса.

Электрофизические параметры датчиков излучения инфракрасного и видимого диапазонов спектра на основе бинарных и тройных полупроводниковых соединений определяются структурным совершенством кристаллов и поликристаллических пленок, что обеспечивается прецизионным контролем температурного режима их выращивания [1]. Технологическими особенностями синтеза и роста полупроводниковых кристаллов являются длительность этих процессов (от нескольких дней до нескольких недель), использование различных методов синтеза соединений (Бриджмена, Чохральского, зонной плавки и их модификаций), высокие температуры процессов и агрессивность используемых химических элементов (ртути, кадмия, теллура и др.). Такие технологические процессы очень трудоемки, а их нарушение может привести к экологическому загрязнению окружающей среды.

Для оптимизации технологического процесса необходимо решить несколько задач, главными из которых являются автоматизация управления режимами работы отдельных технологических установок и оптимизация обработки информационных данных о параметрах процесса. В целом данная техническая проблема может быть определена как задача оптимального управления системой, состоящей из совокупности нескольких технологических объектов. Решение этой задачи необходимо искать для каждого конкретного случая в зависимости от граничных условий.

Для кристалльного полупроводникового производства существует много решений конкретных технологических задач, которые нашли свое воплощение в промышленных технологических установках. Однако описание комплексного и универсального подхода к решению указанной задачи с помощью локальной технологической сети, состоящей из установок различных типов, в литературе отсутствует.

Целью данной работы является разработка аппаратно-программных средств локальной технологической сети, позволяющей автоматизировать процесс

кристалльного производства и формирования тонкопленочных структур на основе соединений CdTe, HgMnTe, CdZnTe и др. в лабораторных условиях. Под технологической сетью (ТС) мы понимаем локальную информационно-коммуникационную сеть, обеспечивающую взаимосвязь отдельных технологических объектов (ТО) на физическом уровне и предназначенную для программно-управляемой передачи информационных сигналов измерения физических величин от ТО к устройству управления (УУ) и управляющих сигналов от УУ к ТО.

Предложенная технологическая сеть (рис. 1) построена по классической схеме звезды [2, с. 44] и состоит из отдельных модулей, управляемых серверной ЭВМ. Каждый модуль включает локальную (Л) ЭВМ, устройство сопряжения с объектом (УС) и отдельный ТО. Физическая модель разрабатываемой системы определяет ТО в виде высокотемпературных печей для выращивания полупроводниковых кристаллов методом Бриджмена и вакуумные установки для напыления металлических и полупроводниковых пленок методами термического или магнетронного распыления материала. Непосредственное управление технологическими установками для высокотемпературных процессов осуществляется микропроцессорными устройствами на базе микроконтроллеров и персональными компьютерами (ПК).

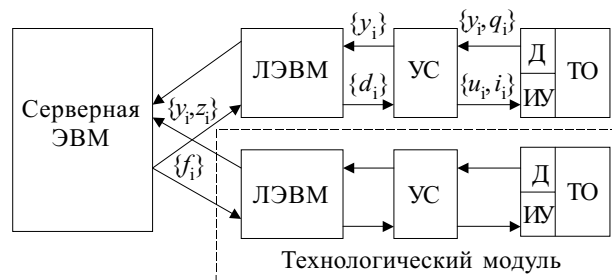


Рис. 1. Функциональная схема технологической сети

Коммутация оборудования к ПК реализована через параллельный или последовательный интерфейс [1, 3]. Поэтому техническое решение задачи оптимального управления ТС проводится в два этапа. На первом этапе реализуется разработка УС, предназначенных для непосредственной автоматизации ТО, а на втором – разработка программного обеспечения (ПО) и применение стандартного (сетевых карт) и специализированного (маршрутизаторов и т. п.) сетевого

оборудования для оптимизации контролирующих и управляющих функций системы.

Используемые в настоящее время в полупроводниковом производстве серийные высокоточные программируемые регуляторы типа "РИФ" и "ВРТ" [1] частично решают вопросы автоматизации управления ТО. В регуляторах типа "РИФ" даже предусмотрена возможность работы по заданной программе. Но они характеризуются достаточно низкой надежностью, ограниченностью программируемых функциональных режимов и отсутствием возможности накопления и математической обработки информации.

Указанные недостатки устраняются при использовании в качестве УС микроконтроллеров PIC16C74, AT90S8535 и их аналогов, имеющих, кроме встроенных аналогово-цифровых преобразователей (АЦП), также и репрограммируемые блоки памяти (EPROM) [4, 5].

Массив входных сигналов, поступающих на УС, включает множество информационных аналоговых сигналов $\{x_i\}$ от датчиков контроля температуры в различных зонах технологических печей, температуры подложек и давления в вакуумных камерах, а также дискретных сигналов $\{q_i\}$, отражающих состояние заслонок испарителей в вакуумной камере, скорость движения ампулы в зонной печи, концевых выключателей и т. п. Контроль данного массива сигналов осуществляется, как правило, в режиме циклического сканирования датчиков (Д) согласно программе управления, записанной в памяти ПИС-контроллера. После аналогово-цифровой обработки данный массив преобразуется в обобщенный цифровой массив $\{y_i\}$ и запоминается в виде файла архива данных измерений в памяти локальной ЭВМ. В зависимости от задачи контроля полученные данные обрабатываются и могут отображаться в табличном и/или графическом виде на локальном дисплее и транслироваться на сервер.

Транспортный поток от локальной ЭВМ, кроме цифрового массива $\{y_i\}$, содержит массив событий $\{z_i\}$ контроля состояний ПК. Управляющие сигналы сервера $\{f_i\}$ содержат инструкции протоколов сетевого обмена информацией и сигналы коррекции управления технологическим процессом $\{d_i\}$. От сервера к локальной машине они передаются в пакетном режиме. Функции управления $\{d_i\}$ дешифруются в ПК и при необходимости транслируются в УС. После цифро-аналоговой обработки в УС они поступают на исполнительные устройства (ИУ) и механизмы ТО в виде запрограммированных уровней тока или напряжения $\{i_i, u_i\}$ (рис. 1).

Сервер выполняет функции установления связи с отдельными объектами системы через периферийные ЭВМ; сбора, обработки и хранения данных, которые поступают с отдельных технологических установок;

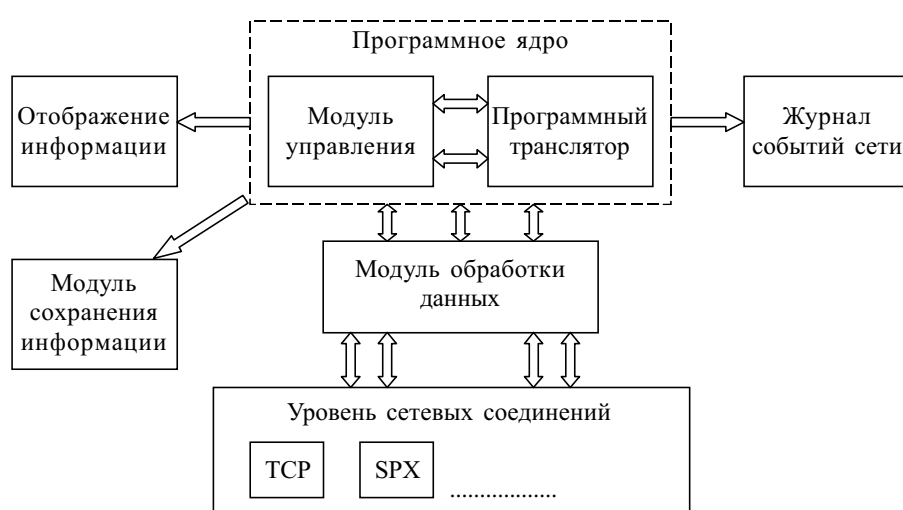


Рис. 2. Структурная схема программного обеспечения сервера

реагирования на события, происходящие в сети; протоколирования событий в системе; контроля работоспособности периферийных машин и локальных линий связи.

Структура серверного программного обеспечения (ПО) показана на рис. 2.

Уровень сетевых соединений — это функциональный модуль, предназначенный для соединения с клиентами по определенным сетевым протоколам — TCP, SPX и др. Реализация каждого протокола представляется в виде отдельной библиотеки динамического подключения (формата *.DLL), которая присоединяется к программному обеспечению сервера по технологии plug-in. Такой подход позволяет использовать для передачи разные сетевые протоколы без перекомпиляции всего ПО, а также обеспечивает гибкость в проектировании и налаживании всей сети. Кроме этого он позволяет использовать в качестве канала передачи данных произвольные каналы связи, включая обычные Ethernet-сети, основное требование к которым — поддержка их работы на стороне клиента и наличие модуля для серверной части.

Модуль обработки данных выполняет все операции для представления данных, которые транслируются между сервером и локальными модулями системы на уровне сетевых соединений. Поскольку достаточно трудно унифицировать все возможные ТП, то для управления работой серверного ПК разработан программный транслятор. Он представляет собой несложный алгоритмический язык, позволяющий запрограммировать действия сервера на определенные события. Сервер протоколирует время, дату и описание предусмотренных программой событий и внешних ситуаций ТС в „Журнал событий сети“.

Для унификации процесса передачи данных разработан протокол высокого уровня TNP (Technological Network Protocol), который использует протоколы уровня сетевых взаимодействий. Он представляет собой набор команд, предназначенных для контроля параметров состояния технологических модулей и обмена информацией между ними и серверной ЭВМ. При необходимости фиксированный набор команд TNP, таких как соединение, готовность к приему данных,

передача данных, запрос на обслуживание, конец связи и др., можно дополнить специфическими командами в зависимости от типа ТП, физической реализации сети, типа передаваемой информации и т. д. Также возможна разработка сетевых драйверов, что позволит напрямую управлять коммуникационными портами ПК (LPT, COM, USB) через сеть.

На стороне локальной ЭВМ, в зависимости от задач управления и обработки данных, реализацию данного протокола обеспечивает стандартное ПО и/или разработанные библиотеки динамического подключения, которые реализуют протокол TNP на основе определенного сетевого протокола. Это позволяет без значительных изменений в существующем программном обеспечении технологической установки передавать данные на сервер, а разработка программного обеспечения для конкретной технологической установки не требует знания методики программирования протоколов передачи данных. Соответственно предлагаемое программное обеспечение сервера является независимым от типа обслуживаемого технологического оборудования.

Визуальное представление результатов на сервере реализовано в простой и понятной пользователям форме с использованием технологии объектно-ориентированного анализа и проектирования [6]. Существует возможность просмотра динамики изменения каждого параметра технологического процесса или событий сети, а также одновременное представление данных в обобщенном окне в виде обычного пульта управления (рис. 3). Конфигурирование оконного интерфейса пользователя происходит в автономном режиме при инициализации отдельных модулей системы.

В системе также предусмотрено применение обработки видеoinформации о технологических процессах, потенциально опасных для обслуживающего персонала. В качестве источника видеосигнала можно использовать стандартные аналоговые или цифровые видеокamеры или WEB-камеры, подключаемые к локальным ЭВМ через USB-порт. Однако для использования видеoinформации в процессе управления необходимо разработать специфическое интеллектуальное ПО, обеспечивающее распознавание и идентификацию изображений и принятие решений.

Экспериментальное моделирование аппаратно-программного обеспечения для технологической сети на основе клиент-серверного подхода при использовании трех технологических объектов показало достаточную надежность работы системы и значительное уменьшение трудоемкости контроля и управления параметрами технологического процесса. Время разработки t_n аппаратно-программного обеспечения для нового технологического модуля, включаемого

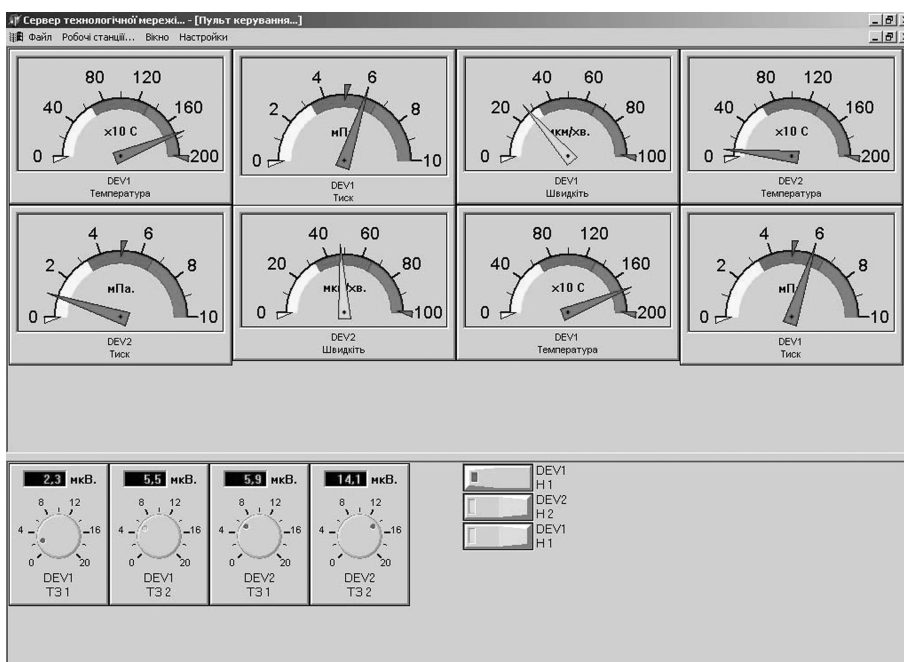


Рис. 3. Пульт управления

в систему, приблизительно обратно пропорционально общему количеству модулей N в системе: $t_n \approx 1/N$. Уменьшение трудоемкости ТП обеспечивается уменьшением количества обслуживающего персонала.

Используемая модель технологической сети и универсальный подход к созданию программного обеспечения позволяет значительно сократить сроки проектирования и наладки систем при изменении конфигурации сети и подключении нестандартных технологических модулей. Применение различных сетевых протоколов и разработанных динамических библиотек позволяет реализовать произвольную конфигурацию технологической сети и использовать в качестве каналов связи существующие технологии построения локальных сетей. Число станций (технологических модулей) сети практически не ограничено, поскольку их адресация определяется требованиями стандартных сетевых технологий. Предложенный протокол TNP (Technological Network Protocol) значительно упрощает процесс обработки и трансляции данных и повышает производительность системы.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Раренко І. М., Воробець Г. І., Воробець О. І. та ін. Контролер керування температурними режимами вирошування напівпровідникових плівок на базі ІВМ РС / Мат-ли ІХ Міжнар. конф. "Фізика і технологія тонких плівок". Т. 1.— Івано-Франківськ: Місто НВ, 2003.— С. 58—59.
2. Олифер В. А., Олифер Г. Н. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы.— СПб.: Питер, 2002.
3. Воробець Г. І., Воробець О. І., Воропаєва С. Л., Горлей П. М. Приспій для автоматизації оптичних досліджень бар'єрних структур на основі напівпровідникових сполук A^2B^6 , A^3B^5 // Вісник Київського нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. Фізика.— 2004.— № 6.— С. 40—42.
4. Таверньє К. ПІС-мікроконтроллери. Практика применения.— М.: ДМК Пресс, 2003.
5. Голубцов М. С., Кириченко А. В. Микроконтроллеры AVR: от простого к сложному.— М.: Солон-Пресс, 2004.
6. Буч Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на С++.— М.: Бинум, 2000.

К. т. н. И. М. СОЛЬСКИЙ, к. ф.-м. н. Д. Ю. СУГАК,
к. ф.-м. н. В. М. ГАБА

Украина, г. Львов, НПП «Карат», НУ «Львовская политехника»
E-mail: solskii@carat.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
24.05 2005 г.

Оппонент д. ф.-м. н. С. Б. УБИЗСКИЙ
(НУ "Львовская политехника", г. Львов)

ПОЛУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИ ОДНОРОДНЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ БОЛЬШИХ РАЗМЕРОВ

Разработана промышленная технология (конструкция теплового узла, параметры процессов выращивания и монодоменизации), позволяющая получать оптически качественные монокристаллы ниобата лития.

Монокристаллы ниобата лития (LiNbO_3), имеющие уникальный набор акустоэлектронных, акустооптических, нелинейно-оптических свойств, известны и успешно используются в электронной технике в качестве активных элементов огромного числа приборов уже более 30 лет. Однако фактором, который до сих пор сдерживает более широкое использование этих материалов в лазерной технике, нелинейной, поляризационной и интегральной оптике, оптоэлектронике, является сложность разработки воспроизводимой технологии получения кристаллов, которые имели бы большой (≥ 80 мм) диаметр и длину цилиндрической части ($L \geq 80$ мм) и в то же время обладали высокой оптической однородностью.

В настоящей работе рассматривается технология, разработанная на научно-производственном предприятии «Карат», которая позволяет воспроизводимо получать по методу Чохральского монокристаллы ниобата лития высокого оптического качества и больших геометрических размеров.

Рассмотрим коротко физико-химические свойства кристаллов ниобата лития.

Структура кристаллов представляет собой последовательность искаженных кислородных октаэдров, катионы в которых расположены в следующем порядке: Nb, вакансия, Li, Nb, вакансия и т. д. (рис. 1) [1]. Пространственная группа симметрии кристаллов в сегнетоэлектрической фазе $R3c$. Некоторые физико-химические параметры кристаллов приведены в таблице (согласно [2] и проспектов фирм YCC, Япония; ALKOR, Россия; OXIDAL, Украина).

Химический состав монокристаллов ниобата лития лишь в отдельных случаях описывается химической формулой LiNbO_3 . Реальные кристаллы заметно отличаются от стехиометрического состава. Если при выращивании кристаллов соотношение $R=\text{Li}/\text{Nb}$ в расплаве изменяется от 1,2 до 0,8, то в кристалле величина R будет находиться в границах от 1,04 до 0,96 [2]. Конгруэнтное плавление происходит при содержании Li_2O 48–49 мол.%. Изменение соотношения R является одним из основных источников возникновения точечных дефектов в кристаллах ниобата лития. В работах [3, 4] указывается, что при $R < 1$ превосходящими дефектами являются комплексные дефекты, которые содержат вакансию лития и ион ниобия в позиции лития. При $R > 1$ в кристаллах возникают кислородные вакансии [2]. В зависимости

от значения R изменяются некоторые физические свойства кристаллов, в первую очередь такие как температура Кюри, двулучепреломление и т. п. [2].

Край поглощения кристаллов определяется непрямыми переходами [5–7]. В диапазоне 0,3...4,5 мкм кристаллы ниобата лития прозрачны [8], лишь в области 2,860 мкм (3500 см^{-1}) наблюдается поглощение OH^- -групп, величина которого зависит от значения R , а также от ориентации кристалла относительно направления распространения света [9]. Детально кристаллическая и доменная структура, сведения об электрических, электро-, нелинейно- и акустооптических, фотоэлектрических и фоторефрактивных свойствах кристаллов приведены в [1, 2].

Начиная с момента первого получения монокристаллов ниобата лития они выращивались методами Степанова, Стокбаргера, Чохральского [2, 9, 10]. Однако, как оказалось, только метод Чохральского удовлетворяет требованиям промышленного производства кристаллов ниобата лития (НЛ) и обеспечивает воспроизводимость их технических характеристик [2, 11].

Основной проблемой, которая возникает при получении однородных, структурно совершенных кристаллов НЛ большого размера, является (кроме чисто-

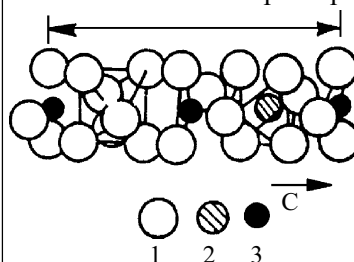


Рис. 1. Фрагмент кристаллической структуры монокристалла ниобата лития:
1 — кислород; 2 — ниобий; 3 — литий

Физико-химические параметры LiNbO_3

| Структура кристалла | Гексагональная |
|---|----------------------|
| Пространственная группа симметрии | $R3c$ |
| Точечная группа симметрии | $3m$ |
| Параметр решетки, нм (a) | 0,5148 |
| Параметр решетки, нм (c) | 1,3863 |
| Теплоемкость, Дж/(К·моль) | 89 |
| Температурный коэффициент расширения α_a , K^{-1} | $16,7 \cdot 10^{-6}$ |
| Температурный коэффициент расширения α_c , K^{-1} | $2,0 \cdot 10^{-6}$ |
| Плотность, г/см^3 | 4,6 |
| Твердость по шкале Мооса | 5 |
| Растворимость, моль/л | 10^{-4} |
| Молекулярный вес | 147,8 |
| Температура плавления, К | 1526 ± 3 |
| Температура Кюри, К | 1406 |

ты исходного сырья [2]) оптимизация температурных режимов в процессе выращивания [12, 13], что включает в себя:

- создание однородных относительно больших осевых градиентов температуры на границе раздела «расплав—кристалл» и минимальных радиальных градиентов на поверхности расплава;

- обеспечение однородных, на порядок меньших, осевых градиентов в пространстве над расплавом;

- охлаждение кристаллов в режиме, который предотвращает возникновение в них напряжений и растрескивание.

Что касается высокой чистоты исходного сырья, то полностью предотвратить вхождение неконтролируемых примесей в кристалл, в особенности ионов железа, не удастся. Чрезвычайно важным это становится в условиях промышленного производства, когда для обеспечения высокого коэффициента использования исходного сырья происходит его многократная (до 15 раз) догрузка в тигель.

Проблема стабилизации тепловых условий более сложная, и единых подходов к ее решению нет. Это обусловлено большим количеством факторов, которые влияют на температурные режимы: объем ростовой камеры, объем и соотношение между диаметром и высотой тигля, масса загружаемого сырья, тип используемой теплоизоляции и т. д. Взаимосвязаны с тепловыми условиями выращивания и другие технологические параметры — скорость вращения кристалла и скорость вытягивания. Поэтому задачу температурной стабилизации решают исходя из конкретных условий и технологических возможностей. Безусловно, что первоочередной задачей является конструирование теплового узла.

В большинстве случаев тепловой узел включает в себя не только хорошо теплоизолированный тигель, но и экран из платины, который размещается над тиглем. Причем чаще всего (например [2, 14, 15]) предлагается разогревать экран специально размещенным вокруг него нагревателем — отдельный виток индуктора при высокочастотном нагреве или отдельная секция нагревателя при резистивном нагреве. (По нашему мнению, использование дополнительного витка индуктора усложняет процесс регулирования разности температур между тиглем и экраном и не является рациональным, в особенности в случае использования тиглей свыше 100 мм в диаметре.)

В зависимости от конструкции теплового узла и размеров тигля экспериментально определяются величины градиентов и иные технологические параметры. Так, в работах [14, 15] при получении кристаллов диаметром 50 мм и длиной 100 мм градиент температуры над поверхностью расплава поддерживался на уровне 30 К/мм, скорость вытягивания составляла 3 мм/ч, а скорость вращения — 10 об/мин. В работе [16] при выращивании монокристаллов НЛ, легированных оксидом магния, градиент температуры над расплавом поддерживался в границах 20—30 К/мм, скорости вытягивания и вращения составляли соответственно 2,5 мм/ч и 20—22 об/мин. При выращивании кристаллов НЛ–Mg диаметром два дюйма в работе [17] градиент температуры над поверхностью

расплава изменялся в границах 20—50 К/мм, скорости составляли: вытягивания — 1—3 мм/ч, вращения — 8—20 об/мин. Авторы [18] при выращивании оптически высококачественных кристаллов НЛ диаметром 80 мм поддерживали осевой градиент температуры на границе «расплав—кристалл» 20 К/мм, а в пространстве над расплавом — 9 К/мм. При этом скорости вытягивания и вращения соответственно составляли 3,2—3,8 мм/ч и 7—20 об/мин.

Рассмотрим подходы, которые позволили создать на технологической базе Львовского НИИ материалов НПП «Карат» промышленную технологию получения монокристаллов ниобата лития, обеспечивающую выпуск кристаллов НЛ и НЛ–Mg трех направлений кристаллографической ориентации высокого оптического и акустического качества.

Подготовка шихты

Для выращивания монокристаллов НЛ использовалась шихта ниобата лития производства Соликамского магниевого завода марки «осч 9-3», ТУ 6-09-26-517–86. Исходное сырье для выращивания монокристаллов НЛ имело стехиометрический состав, который контролировался методом фотометрии пламени (содержимое лития) и гравиметрическим методом (содержимое ниобия). Исходное сырье содержало литий в границах 4,36...4,56 мас.%, ниобий — в границах 62,9...63,5 мас.%. Такие значения отвечают стехиометрическому составу LiNbO_3 . Относительная погрешность определения лития в сырье составляла 0,2...0,4%, Nb — 0,39...0,48%.

Использование исходного сырья в виде порошка для наплавки малоэффективно, поскольку для заполнения тигля необходимо проводить несколько циклов наплавки. В связи с этим для наплавки исходную шихту прессовали в «таблетки» и отжигали. Прессование проводилось с помощью пресса П-10 при усилии $6 \cdot 10^4$ — $7 \cdot 10^4$ Н и выдержке 20 с. Толщина таблеток находилась в границах 35—40 мм, диаметр — 100 мм. Спрессованные таблетки отжигали на воздухе в керамических тиглях при температуре 1373—1423 К на протяжении 5 ч.

Для достижения конгруэнтного соотношения компонентов в расплаве ($R=\text{Li}_2\text{O}/\text{Nb}_2\text{O}_5=0,96$) проводилась двойная перекристаллизация шихты. Важно отметить, что данная операция позволила также понизить содержание неконтролируемых примесей в сырье до уровня $<10^{-4}$ мас.%.

Технологические особенности выращивания монокристаллов

Выращивание монокристаллов ниобата лития проводилось по методу Чохральского на установках фирмы PHYSITERM (Франция) с использованием высокочастотного нагрева из платиновых тиглей. Контроль диаметра растущего кристалла проводился весовым методом. Процесс выращивания был полностью компьютеризирован.

Схема разработанного теплового узла установки выращивания представлена на рис. 2. Тепловой узел состоит из коаксиально установленных кварцевой и корундовой труб, в середине которых на столике, собранном из корундовых дисков, помещен тигель. Теп-

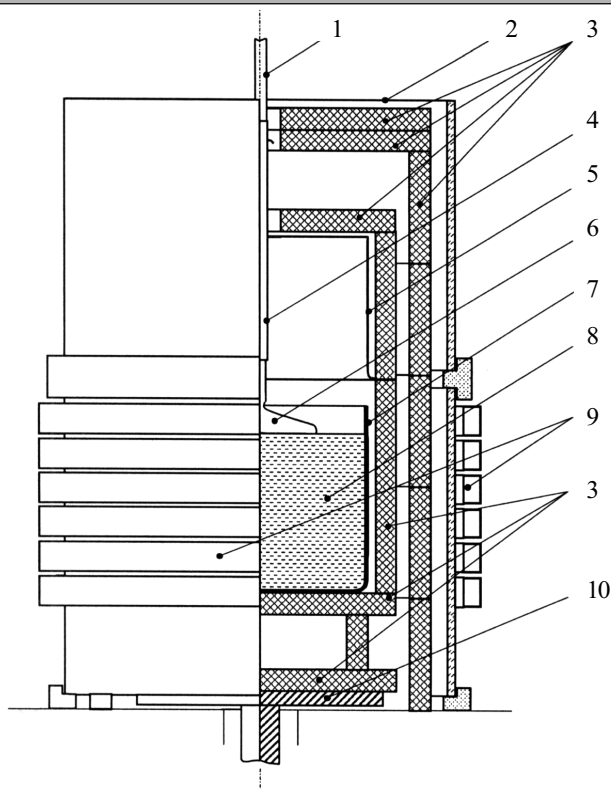


Рис. 2. Тепловой узел для выращивания ниобата лития: 1 — металлический шток; 2 — кварцевая труба; 3 — корундовая керамика; 4 — платиновая пробирка; 5 — платиновый экран; 6 — кристалл; 7 — платиновый тигель; 8 — расплав; 9 — индуктор; 10 — металлический столик

ловая изоляция тигля обеспечивалась корундовой керамикой.

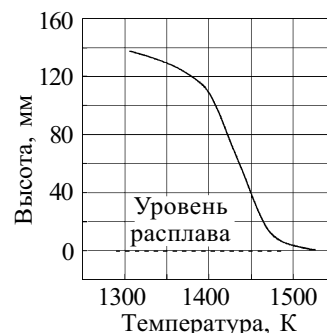
Для выращивания монокристаллов НЛ диаметром 80 мм и длиной цилиндрической части ≥ 80 мм использовали тигель диаметром 160 мм и высотой 140 мм с толщиной стенок 2 мм. Верх тигля находился на уровне верхнего витка индуктора.

Для создания градиентов температуры в пространстве над расплавом в экспериментах использовались два варианта. Первый — когда в пространстве над тиглем был размещен резистивный нагреватель, второй — когда в пространстве над тиглем был помещен тепловой экран из платины диаметром 160 мм, высотой 140 мм и толщиной стенки 1 мм. Экран имел отверстия для введения штока с затравкой и наблюдений.

Достичь градиента температуры, при котором воспроизводимо получались кристаллы НЛ высокого качества, удалось с использованием второго варианта. При этом в экспериментах изменялось расстояние платинового экрана от верхней кромки тигля, а сам экран мог быть как активным (разогреваться высокочастотным электромагнитным полем), так и пассивным — в зависимости от расстояния от индуктора. Оптимальное расстояние составляло 15—20 мм. Градиент температуры, который возникает в вертикальном направлении при таком расположении экрана, приведен на рис. 3.

При оптимизации технологических параметров было установлено, что оптимальная скорость выращивания кристаллов НЛ диаметром 80 мм должна составлять 5 мм/ч при затравливании и постепенно

Рис. 3. Градиент температуры в вертикальном направлении при выращивании монокристаллов ниобата лития



уменьшаться до 3—4 мм/ч при выходе на цилиндрическую часть.

Монокристаллы НЛ выращивались преимущественно в направлениях осей Z (для оптических элементов), $Y+128^\circ$ и $Y+36^\circ$ (для устройств акустоэлектроники).

Для кристаллов НЛ диаметром 80 мм, которые выращивались в направлении оси Z, были определены оптимальные режимы вращения (рис. 4). На начальной стадии при затравливании скорость вращения должна составлять 10 об/мин. В процессе разрастания конусной части скорость вращения линейно снижается до 8 об/мин и в дальнейшем при выращивании цилиндрической части не изменяется (рис. 4, а). Установлено, что оптимальная высота конусной части, которая обеспечивает необходимое качество кристалла данных размеров, должна составлять 10—15 мм.

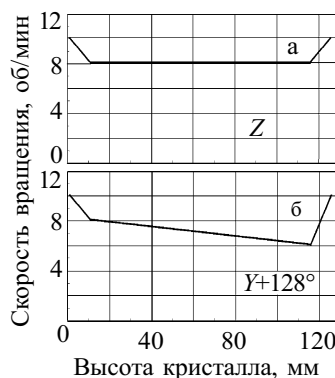


Рис. 4. Графики изменения скорости вращения растущего кристалла в зависимости от его длины

Для кристаллов, которые выращиваются в направлениях $Y+128^\circ$ и $Y+36^\circ$, скорость вращения при затравливании составляет 10 об/мин. В процессе разрастания конусной части скорость вращения линейно снижается до 8 об/мин и в дальнейшем при выращивании цилиндрической части ее значение линейно уменьшается до 6 об/мин (рис. 4, б).

Экспериментально установлено, что для получения качественного, ненапряженного кристалла особое внимание должно быть уделено начальной стадии процесса выращивания. После полного расплавления сырья в тигле расплав необходимо выдержать на протяжении 1—2 ч при температуре выше температуры плавления на 50—100 К. Это обеспечивает полное перемешивание расплава и его гомогенизацию. После этого температуру понижают до 1523 ± 2 К и начинают затравливание. Разрастание должно происходить плавно, без резких расширений или подреза-

ния кристалла. Кристаллы, в которых на начальной стадии выращивания формируются грани, не расстрескиваются и растут ненапряженными.

Монодоменизация кристаллов

Монокристаллы НЛ после выращивания являются полидоменными. Монодоменизацию кристаллов проводят после процесса выращивания — так, чтобы направление поляризации домена совпадало с осью выращивания кристалла [9]. Как правило, в литературе [14, 16, 17] приводится метод монодоменизации, при котором после достижения температуры близкой к температуре Кюри через кристалл пропускают постоянный электрический ток.

Монодоменизация в нашем случае проводилась в печи AS-30 (Франция) с программным управлением. В камере печи устанавливалась керамическая подставка, на которой размещался платиновый электрод в виде пластины. На электрод наносился тонкий слой порошка танталата лития, который предотвращает спайвание электрода с кристаллом. Сверху на слой танталата лития устанавливался кристалл — таким образом, чтобы вся его нижняя поверхность имела контакт с порошком.

На конусной части кристалла также устанавливался платиновый электрод. Благодаря тому, что высота конусной части незначительна (10—15 мм), не было необходимости торцевать кристаллы перед монодоменизацией.

Электроды соединялись с источником постоянного тока. Процесс монодоменизации происходил в следующей последовательности. Сначала температуру печи поднимали до 1455 ± 5 К со скоростью 70 К/ч. Кристалл выдерживали при указанной температуре на протяжении 30—40 мин, после чего включали источник питания. Для кристаллов диаметром 80—85 мм при монодоменизации оптимальная величина тока составляет 50 мА (которую можно достичь при напряжении 18—20 В). Монокристалл выдерживали в электрическом поле и при прежней температуре в течение 5 ч. После этого температуру снижали до 1273 К со скоростью 20—25 К/ч, далее со скоростью 50 К/ч ее снижали до 673 К и затем выключали печь. Источник тока выключали при падении тока в электрической цепи до нуля.

Графики изменения температуры и электрического тока в процессе монодоменизации приведены на рис. 5.

Контроль монодомениности кристаллов базируется на том, что скорость химического травления отличается для участков кристалла НЛ и НЛ–Mg, имеющих разную поляризацию. Для проведения контроля вырезали пластины из верхней и нижней частей кристалла, которые травилась в смеси 1 части HF и 4 частей HNO₃. При комнатной температуре травление происходит на протяжении около 20 ч. При температуре 383 К кристаллы травятся 10 мин. Если кристалл монодоменный, то пластины имеют однородную белую матовую поверхность.

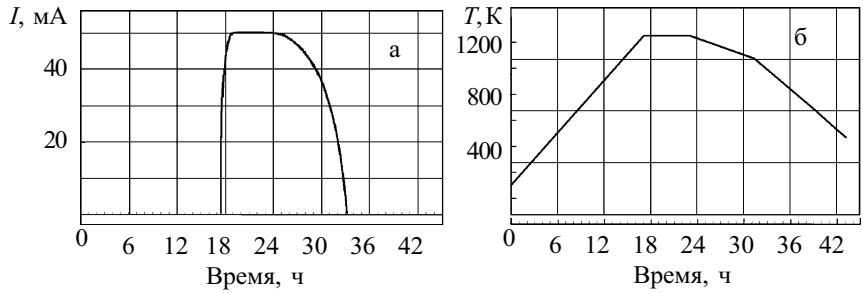


Рис. 5. Графики изменения электрического тока (а) и температуры (б) в процессе монодоменизации

Таким образом, созданная в НПП «Карат» технология выращивания и монодоменизации ниобата лития разрешает воспроизводимо получать монокристаллы НЛ и НЛ–Mg диаметром 80 мм и длиной цилиндрической части не менее 80 мм. На рис. 6 приведены фотографии монокристаллов, полученных по разработанной технологии.

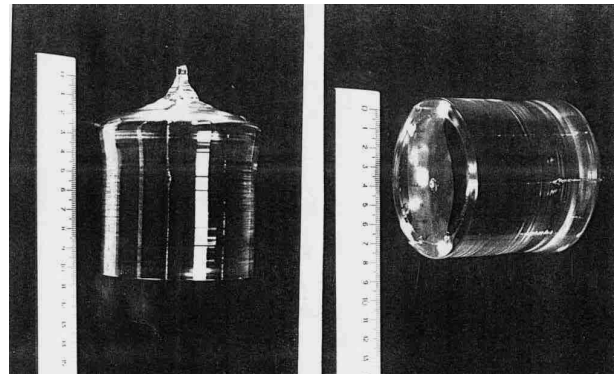


Рис. 6. Фотографии кристаллов, полученных по разработанной технологии

Оптическая однородность и дисперсия показателей преломления монокристаллов ниобата лития

Для исследования оптической однородности кристаллов ниобата лития и подтверждения их высокого качества были независимо использованы две методики. Первая базировалась на наблюдении коноскопической картины, которая возникала при прохождении поляризованного света через кристалл в направлении оптической оси (кристаллографическое направление Z) [19—22]. В основе второй методики [23] лежит явление спонтанного параметрического рассеяния при распространении света (лазерное излучение с длиной волны 488 нм) в кристаллографическом направлении X.

Установка для определения оптической однородности кристаллов НЛ коноскопическим методом состояла из источника света (которым служил гелий-неоновый лазер с $\lambda=633$ нм), скрещенных поляризатора и анализатора, между которыми на столике располагался исследуемый образец. Поверхность образца была перпендикулярной к направлению распространения света. Перед образцом размещалась пластина из матового стекла. Возникающая интерференционная коноскопическая картина наблюдалась на экране, размещенном после анализатора. Для оптиче-

ски одноосного кристалла коноскопическая картина при распространении света вдоль оптической оси имеет вид креста, сформированного изогирами. Если в кристалле возникает оптическая неоднородность, происходит деформация оптической индикатрисы — кристалл становится аномально оптически двуосным, и возникает аномальное двулучепреломление. Это отображается на коноскопической картине — в центре креста появляется просветление, ветви изогир расходятся. Расстояние между экстремумами ветвей изогир b однозначно связано с углом (V_a), который составляют между собою аномальные оптические оси:

$$V_a = \arcsin \frac{b/2L}{n_0 \left(1 + (b/2L)^2\right)^{1/2}}, \quad (1)$$

где L — расстояние от кристалла до экрана;
 n_0 — обычный показатель преломления НЛ на длине волны 633 нм.

С другой стороны, известно [2], что величина аномального двулучепреломления Δn_a связана с углом V_a выражением

$$\sin V_a = \left(\frac{\Delta n_a}{n_0 - n_e} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

откуда

$$\Delta n_a = \frac{n_0 - n_e}{n_0^2} \sin^2 [2 \operatorname{arctg} (b/2L)], \quad (3)$$

где n_e — необычный показатель преломления.

Использование столика, который перемещается в двух направлениях, позволило просканировать всю поверхность кристалла с шагом 3 мм (который ограничивался диаметром пятна лазерного излучения) и получить топограмму величины Δn_a . Для получения данных об однородности всего объема були НЛ кристалл был последовательно разрезан на пластины толщиной до 20 мм, каждая из которых была просканирована лазерным лучом.

Полученные топограммы величины Δn_a представлены на рис. 7. Как видно из рисунка, наиболее неоднородными являются конические части були и участки, прилегающие к цилиндрическим поверхностям були, в которых максимальные значения Δn_a достигают $(10 \dots 50) \cdot 10^{-6}$. Большая часть кристалла характеризуется значениями $\Delta n_a (1 \dots 6) \cdot 10^{-6}$. Наиболее однородные участки находятся в верхней части були.

Следует отметить, что коноскопические исследования разрешают не только измерять абсолютные значения Δn_a . По направлению расхождения изогир можно определять и направление, в котором деформируется оптическая индикатриса кристалла. Мы специально акцентируем внимание на этом моменте, т. к., насколько нам известно, это явление оставалось без внимания исследователей, хотя оно имеет важное значение при отборе качественных участков кристалла для изготовления оптических элементов. Выбранный участок может содержать области, которые имеют одинаковые и незначительные абсолютные значения Δn_a , но при этом может изменяться знак величины аномального двулучепреломления, т. е. оптическая индикатриса может быть деформированной в разных

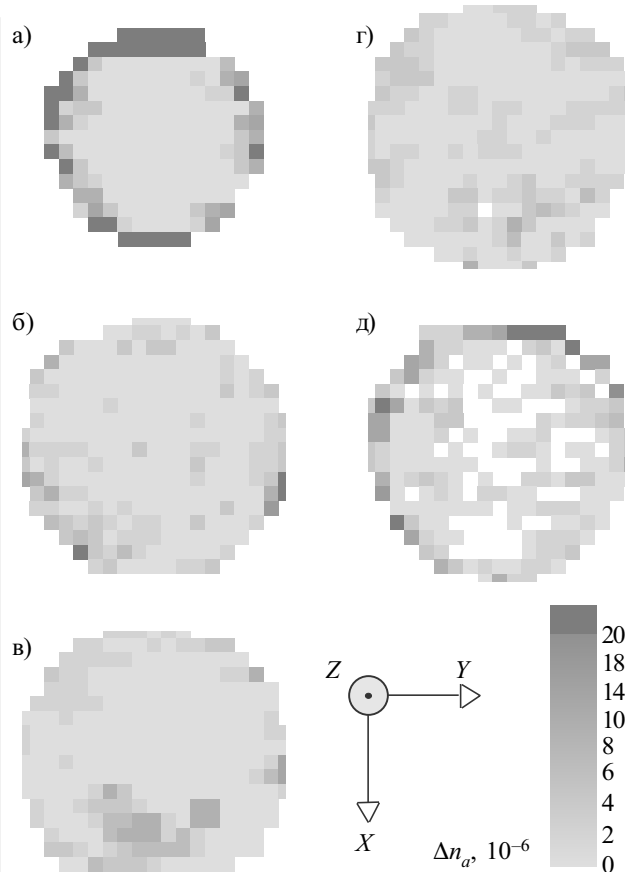


Рис. 7. Топограммы величины Δn_a для серии сечений кристалла (a — начало були, $г$ — конец були). Толщина образцов 20 мм, диаметр були 80 мм

направлениях. Высокого и однородного значения поляризационного контраста для таких элементов достичь невозможно. Поэтому при отборе оптически качественных участков кристалла с помощью коноскопической методики обращалось внимание не только на величину Δn_a , но и на однородность направления деформации оптической индикатрисы.

Результаты, полученные с помощью коноскопической методики, коррелируют с результатами, полученными при использовании методики, которая базируется на явлении спонтанного параметрического рассеяния света. Эта методика разрешала определить величину абсолютного изменения Δn_e показателя преломления n_e вдоль направления распространения света, которое совпадает с кристаллографическим направлением X . Размеры образца, на котором проводились исследования, составляли 75 (Y), 85 (Z) и 23 (X) мм.

Топограмма значений Δn_e , полученная в плоскости YZ с шагом 4 мм, приведена на рис. 8. На этом же рисунке показаны изменения Δn_e вдоль выбранных направлений поперек були: в верхней ее части (15 мм от начала були, рис. 8, a), средней (40 мм от начала були, рис. 8, $б$) и нижней (65 мм от начала були, рис. 8, $в$), а также вдоль оси роста (Z) в центре були (рис. 8, $г$).

Как видно из рисунков, наиболее однородные области расположены в первой трети объема кристалла и в его центральной части. Наименее однородные об-

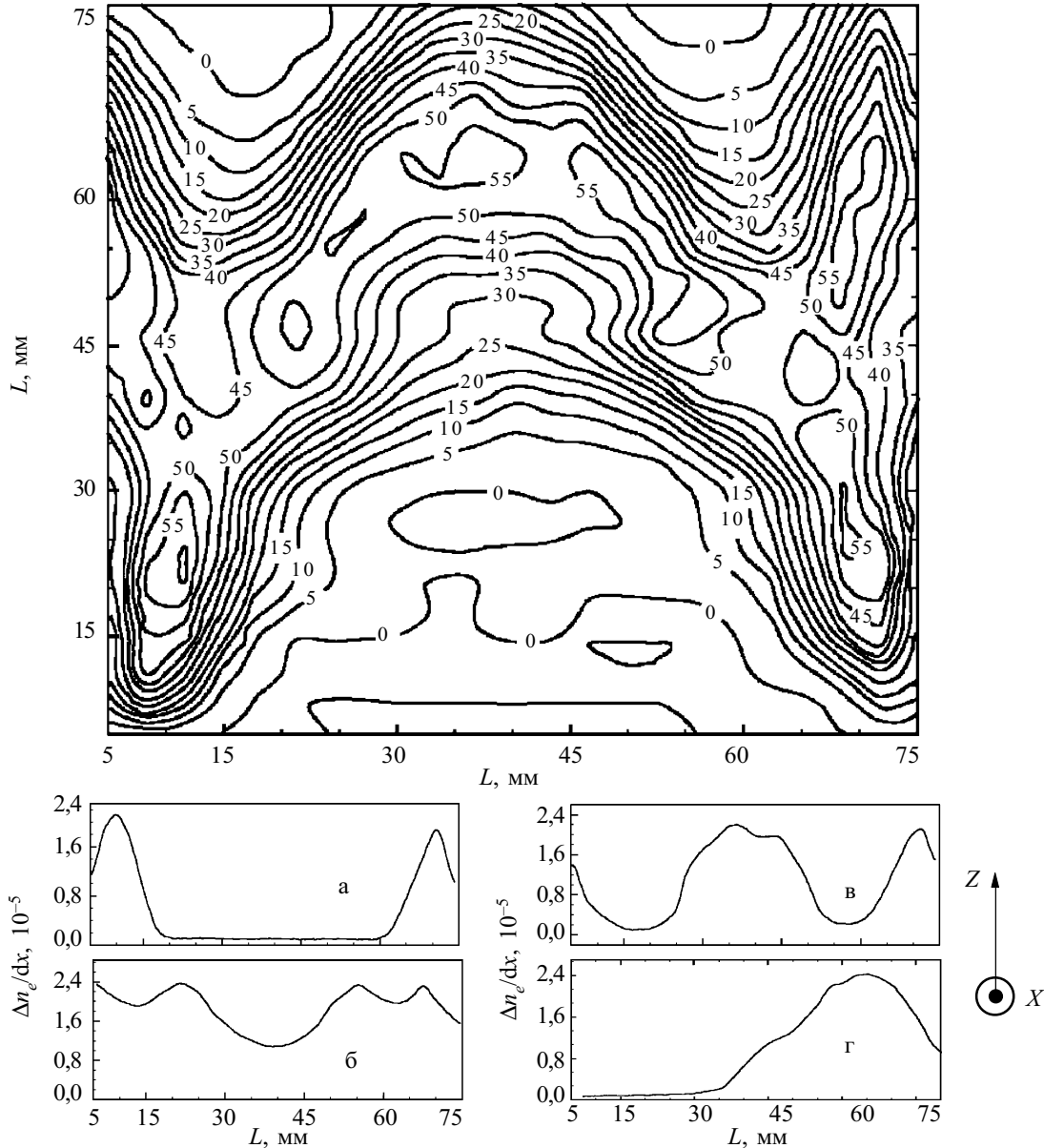


Рис. 8. Топограмма абсолютных значений неоднородности коэффициента преломления величины Δn_e (толщина образца 23 мм)

ласти находятся вблизи поверхности кристалла. В целом большая часть имеет значение $\Delta n_e/dx$, которое не превышает $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$, что отвечает критерию оптической однородности для кристаллов нелинейной оптики, приведенному в [24].

Следует заметить, что топограмма значений Δn_e имеет определенную симметрию относительно оси Z. Вероятно, мы имеем отображение на плоскость YZ формы фронта кристаллизации или, другими словами, поверхности *постоянного* состава кристалла (поскольку именно величина показателя преломления наиболее чувствительна к изменениям химического состава кристалла [25, 26]), которая определяется линиями изотерм.

Для расчета и конструирования оптических элементов из монокристалла ниобата лития, в первую очередь генераторов света высших гармоник и параметрических усилителей света, нужно знать ве-

личины показателей преломления и их дисперсию [2, 27]. Измерению и исследованию показателей преломления НЛ посвящено огромное количество работ, в частности [25—28], получены формулы, которые описывают как дисперсию показателей, так и ее температурную зависимость. Однако известно [2, 18, 25], что значение показателей преломления (в особенности n_e) существенно зависит от соотношения $\text{Li}_2\text{O}/\text{Nb}_2\text{O}_5$ в кристалле. Поэтому в идеальном случае для создания высококачественных оптических элементов существует необходимость определения n_0 , n_e и их дисперсии для каждого кристалла.

В наших исследованиях для определения показателей преломления и их дисперсии был использован метод призмы. Источниками света служили ртутная лампа и гелий-неоновый лазер. Углы измерялись с помощью гониометра ГС-5. Полученные результаты

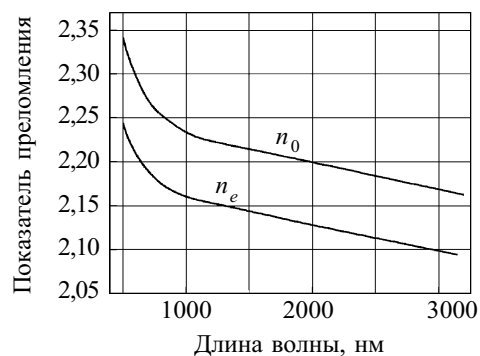


Рис. 9. Дисперсия показателей преломления

приведены на **рис. 9**. Эти результаты хорошо согласуются с данными, приведенными в работах [2, 28].

Таким образом, проведенные исследования показали, что кристаллы ниобата лития, полученные по технологии, разработанной в НПП «Карат», имеют высокое оптическое качество и пригодны для изготовления оптических элементов.

Использованные методики позволяют уверенно отбирать наиболее высококачественные участки кристаллов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Лайнс М., Гласс А. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы.— М.: Мир, 1981.
2. Кузьминов Ю. С. Электрооптический и нелинейно-оптический кристалл ниобата лития.— М.: Наука, 1987.
3. Smyth D. M. Defects and transports in LiNbO_3 // *Ferroelectrics*.— 1983.— Vol. 50.— P. 93—102.
4. Smyth D. M. Defect chemistry of LiNbO_3 // ISAF'86: Proc. 6 IEEE Int. Symp. Appl. Ferroelec.— Bethlem, PA.— 1986.— P. 115—117.
5. Вишнеvский В. Н., Марчук Е. П., Михайлишин Я. И., Пидзырайло Н. С. Определение оптических констант монокристаллов LiNbO_3 в области собственного поглощения// *Физ. твердого тела*.— 1975.— Т. 17, № 6.— С. 1780—1782.
6. Barner K., Braunstein R., Weakliem H. A. The optical properties of LiNbO_3 // *Phys. Stat. Sol.(b)*.— 1975.— Vol. 68, N 2.— P. 525—530.
7. Mamedov A. M., Hajieva L. S., Ibragimova I. S., Aliyeva B. S. Vacuum ultraviolet (VUV) reflectivity and electron states in LiNbO_3 // *Physica*.— 1985.— Vol. 128BC, N 1.— P. 61—68.
8. Гусева Л. М., Клюев В. П., Рез И. С. и др. Исследование некоторых оптических характеристик сегнетоэлектрика ниобата лития // *Изв. АН СССР. Сер. Физ.*— 1967.— Т. 31, № 7.— С. 1161—1163.
9. Kovacs L., Szalay V., Capelletti R. Stoichiometry dependence of the OH^- absorption band in LiNbO_3 crystals// *Solid State Commun.*— 1984.— Vol. 52, N 12.— P. 1029—1031.
10. Космына М. Б., Минков Б. И. Методы получения монокристаллов для электроники: иттрий-алюминиевый гранат, ниобат и танталат лития // *Получение и свойства кристаллов*.— 1986.— № 17.— С. 17—18.
11. Pracka I., Giersz W., Swirkowicz M. et al. Lithium niobate as an effective material for manufacturing of electrooptis modulators // *Proc. SPIE*.— 1992.— Vol. 1845.— P. 161—166.
12. Galazka Z. Radial temperature distribution in LiNbO_3 crystals pulled by the Czochralski technique // *J. Cryst. Growth*.— 1997.— Vol. 178.— P. 345—349.
13. Galazka Z. Analysis of thermal shock during rapid crystal extraction from melts // *Cryst. Res. Technol.*— 1999.— Vol. 34, N 5—6.— P. 635—640.
14. Grabmaier B. C., Otto F. Growth and investigation of MgO-doped LiNbO_3 // *J. Cryst. Growth*.— 1986.— Vol. 79.— P. 682—688.
15. Grabmaier B. C., Wersing W., Koestler W. Properties of undoped and MgO-doped LiNbO_3 ; correlation with defect structure// *Ibid.*— 1991.— Vol. 110.— P. 339—347.
16. Zhou Y. F., Wang J. C., Wang P. L., et al. MgO-doping effects on the congruent composition of LiNbO_3 // *Ibid.*— 1991.— Vol. 114.— P. 87—91.
17. Furukawa Y., Sato M., Nitanda F., Ito K. Growth and characterization of MgO-doped LiNbO_3 for electro-optic devices // *Ibid.*— 1990.— Vol. 99.— P. 832—836.
18. Baumann I., Rudolph P., Krabe D., Schalge R. Orthoscopic investigation of the axial optical and compositional homogeneity of Czochralski grown LiNbO_3 crystals // *Ibid.*— 1993.— Vol. 128.— P. 903—908.
19. Михалеvич А. Т., Сольский И. М., Габа В. М. и др. Высококачественные монокристаллы ниобата лития для элементов поляризационной оптики / В кн.: *Радиоэлектронное материаловедение. Ч. 3*.— Львов: НИИ материалов, 1991.— С. 85—91.
20. Sugak D. Y., Solskii I. M., Gaba V. M. et al. Lithium niobate single crystals: growing and investigating optical quality// *Photorefractive materials, effects and devices. PRM'93 Technical digest*.— Kiev, Ukraine.— 1993.— P. 75—77.
21. Sugak D. Y., Matkovskii A. O., Korobenko E. A. et al. Optical elements for near infrared spectra region from high optical quality lithium niobate single crystals // *Proc. SPIE*.— 1994.— Vol. 2206.— P. 592—598.
22. Mikhalevich A. T., Matkovskii A. O., Sugak D. Y. et al. Laser beam control devices on the base of the lithium niobate single crystals // *Opto-Electronics Review*.— 1995.— Vol. 3, N 1.— P. 8—12.
23. Baryshevskii V. G., Voitukevich Yu. A., Lapitskii V. P. et al. Quality testing method of nonlinear crystals by parametric light scattering // *Int. Conf. on Quant. Electron., Vienne*.— Technical Digest. Series 1992.— Vol. 9.— P. 188—189.
24. Shen Y. R. *The principles of nonlinear optics*.— New York: John Wiley & Sons, 1984.
25. Shlarb U., Betzler K. Refractive indices of lithium niobate as a function of temperature, wavelength and composition: a generalized fit // *Phys. Rev B*.— 1993.— Vol. 48, N 21.— P. 15613—15620.
26. Shlarb U., Betzler K. Influence of the defect structure on the refractive indices of undoped and Mg-doped lithium niobate // *Ibid.*— 1994.— Vol. 50, N 2.— P. 751—757.
27. Shlarb U., Reichert A., Betzler K. et al. SHG phase matching conditions for undoped and doped lithium niobate // *Radiation Effects and Defects in Solids*.— 1995.— Vol. 136, N 1.— P. 119—122.
28. Edwards G. J., Lawrence M. A temperature-dependent dispersion equation for congruently grown lithium niobate // *Optical and Quantum Electronics*.— 1984.— Vol. 16.— P. 373—374.

К. ф.-м. н. И. В. ГАДЗАМАН, к. х. н. О. Я. МРУЗ,
д. ф.-м. н. О. И. ШПОТЮК, И. М. БРУНЕЦ

Украина, г. Львов, НПП «Карат»; Дрогобычский
гос. педагогич. ун-т им. Ивана Франко
E-mail: shpotyuk@novas.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
12.07 2005 г.

Оппонент д. ф.-м. н. В. М. ЦМОЦЬ
(ДГПУ им. Ивана Франко, г. Дрогобыч)

ЗАВИСИМОСТЬ СВОЙСТВ ТОЛСТОПЛЕНОЧНЫХ ТЕРМОРЕЗИСТОРОВ ОТ СОСТАВА БАЗОВОЙ ШПИНЕЛИ

Изменением соотношения компонентов шпинели $\text{Cu}_x\text{Ni}_{1-x-y}\text{Co}_{2y}\text{Mn}_{2-y}\text{O}_4$ получены толсто пленочные терморезисторы с удельным объемным электросопротивлением 1,5—33 Ом·м и тепловой константой $B_{25/85}$ 2980—3690 К.

Оксидные полупроводники базовой системы $\text{Cu}_x\text{Ni}_{1-x-y}\text{Co}_{2y}\text{Mn}_{2-y}\text{O}_4$ ($0,1 \leq x \leq 0,8$; $0,1 \leq y \leq 0,9-x$) со структурой шпинели широко используются в производстве терморезисторов (ТР) с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) (например [1]). В НПП «Карат» на базе предложенных материалов разработаны и получены экспериментальные образцы ТР дискового типа для ограничения пусковых токов во вторичных источниках электропитания и лампах накаливания, температурных сенсоров и т. д. Однако требования миниатюризации и, особенно, увеличение темпов производства электронных компонентов привели к наблюдаемой в последнее десятилетие тенденции эволюции дискретных компонентов в интегрированные системы [2]. В связи с этим работы по созданию толсто пленочных ТР с применением методов микроэлектронной технологии [3—5] приобрели особую значимость.

Обычно в качестве базового материала для получения толстых пленок используется оксидная шпинельная электрокерамика смешанных систем переходных металлов Mn-Co и Mn-Co-Ni [6—8], Mn-Co-Fe-Al, Mn-Co-Ni(Ru) и Mn-Co-Ni-Ru [3], Ni-Mn [9]. Ранее была показана возможность получения толстых пленок с большим отрицательным ТКС и хорошей морфологией из стеклосодержащей терморезистивной пасты с пониженной температурой вжигания (850°C) на основе керамики состава $\text{Cu}_{0,1}\text{Ni}_{0,1}\text{Co}_{1,6}\text{Mn}_{1,2}\text{O}_4$ вышеуказанной системы $\text{Cu}_x\text{Ni}_{1-x-y}\text{Co}_{2y}\text{Mn}_{2-y}\text{O}_4$ [10].

Необходимо отметить, что базовая керамика была синтезирована изотермическим спеканием при температуре $T_c = 1100^\circ\text{C}$, которая превышала лимитную температуру стабильности данной шпинели (1040°C [11]). Как следствие, керамика состояла из основной кристаллической фазы кубической шпинели и незначительного количества дополнительной фазы — твердого раствора на основе CoO, выделившегося в результате разложения шпинели, как описано в [12].

Авторы выражают благодарность С. И. Осечкину и П. Ю. Демченко за помощь в проведении исследований.

Следы дополнительной фазы были обнаружены и в толстых пленках.

В настоящей работе представлены результаты сравнительного исследования электрофизических свойств новых толсто пленочных ТР на основе шпинельной керамики системы $\text{Cu}_x\text{Ni}_{1-x-y}\text{Co}_{2y}\text{Mn}_{2-y}\text{O}_4$ ($0,1 \leq x \leq 0,8$; $0,1 \leq y \leq 0,9-x$) в зависимости от их микроструктурных особенностей и состава базовой шпинели. Для исследований выбраны три лимитирующих состава вышеуказанной системы: состав 1 ($x=0,1$; $y=0,8$), состав 2 ($x=0,1$; $y=0,1$) и состав 3 ($x=0,8$; $y=0,1$).

Для приготовления базовой керамики использовали гидроксокарбонат меди (II) и гидроксокарбонаты гидраты никеля (кобальта, марганца) (II). Применяли следующие технологические операции: взвешивание исходных реактивов в необходимых пропорциях, перемешивание (помол) в халцедоновых барабанах в среде дистиллированной воды (планетарная мельница САНД-1), просушивание, просеивание через капроновое сито, кальцинирование на воздухе в течение 4 ч при 700°C (муфельная печь СНОЛ-1), повторный помол, просушивание, смешивание с органическим пластификатором, просеивание и прессование в форме дисков диаметром 11,5 и 25 мм (гидравлический пресс ПГ-10) для дисковых и толсто пленочных ТР, соответственно.

Спекание полученных заготовок осуществляли в воздушной среде (камерная печь ВТП-0,1) в трех температурно-временных режимах, способствующих формированию однофазной шпинельной керамики исследуемых составов:

— режим 1 (применен для состава 1): нагрев с температурным градиентом $+100^\circ\text{C}/\text{ч}$ до 600°C , нагрев ($+200^\circ\text{C}/\text{ч}$) до 1040°C , изотермическое спекание в течение 4 ч при 1040°C , медленное охлаждение ($-100^\circ\text{C}/\text{ч}$) до 850°C и быстрое охлаждение ($-750^\circ\text{C}/\text{ч}$) до 100°C ;

— режим 2 (применен для состава 2): нагрев ($+100^\circ\text{C}/\text{ч}$) до 600°C , нагрев ($+200^\circ\text{C}/\text{ч}$) до 1200°C , изотермическое спекание в течение 1 ч при 1200°C , охлаждение ($-50^\circ\text{C}/\text{ч}$) до 920°C , изотермическое спекание в течение 48 ч при 920°C и быстрое охлаждение ($-1000^\circ\text{C}/\text{ч}$) до 100°C ;

— режим 3 (применен для состава 3): нагрев ($+100^\circ\text{C}/\text{ч}$) до 600°C , нагрев ($+200^\circ\text{C}/\text{ч}$) до 920°C , изотермическое спекание в течение 4 ч при 920°C , медленное охлаждение ($-50^\circ\text{C}/\text{ч}$) до 850°C и быстрое охлаждение ($-700^\circ\text{C}/\text{ч}$) до 100°C .

Фазовый состав объемной керамики и толсто пленочных слоев

| Базовая керамика $Cu_xNi_{1-x-y}Co_zMn_{2-y}O_4$ | | Толсто пленочные ТР | |
|--|--|--|--|
| Номер состава | Химический состав, температура и продолжительность спекания | Фазовый состав | Фазовый состав пленки после вжигания при 850°C |
| 1 | $Cu_{0,1}Ni_{0,1}Co_{1,6}Mn_{1,2}O_4$ 1040°C, 4 ч | Шпинель, пр. гр. $Fd-3m$, $a=0,829406(9)$ нм | Шпинель, пр. гр. $Fd-3m$, $a=0,82930(4)$ нм |
| 2 | $Cu_{0,1}Ni_{0,8}Co_{0,2}Mn_{1,9}O_4$ 1200°C, 1 ч + 920°C, 48 ч | Шпинель, пр. гр. $Fd-3m$, $a=0,84146(4)$ нм; NiO (следы), пр. гр. $Fm-3m$ | Шпинель, пр. гр. $Fd-3m$, $a=0,83695(3)$ нм |
| 3 | $Cu_{0,8}Ni_{0,1}Co_{0,2}Mn_{1,9}O_4$ 920°C, 4 ч | Шпинель, пр. гр. $Fd-3m$, $a=0,83172(4)$ нм; Mn_2O_3 , пр. гр. $Ia-3$, $a=0,9304(7)$ нм; Mn_3O_4 (следы), пр. гр. $I4_1/amd$ | Шпинель, пр. гр. $Fd-3m$, $a=0,83323(3)$ нм; Mn_2O_3 (следы), пр. гр. $Ia-3$, $a=0,9427(2)$ нм |

После осуществления режимов 1—3 образцы керамики извлекали из печи и охлаждали до комнатной температуры.

Терморезистивные пасты получали перемешиванием порошков полупроводниковой фазы — базовой керамики выбранного состава, стекла НТ-524 и Bi_2O_3 с добавлением органического связующего и растворителя в количестве 75,76; 5,30 и 18,94 мас.%, соответственно.

Пасту наносили методом трафаретной печати с использованием ручного станка DFS 0.1, оборудованного стальной сеткой, на подложки типа RUBALIT 708S (96% Al_2O_3) с проводниковой разводкой из серебра. Для получения пленок различной толщины применяли одно- и двукратную печать.

Просушенные толсто пленочные слои вжигали в конвейерной печи ВТУ с выдержкой ≈ 15 мин при 850°C. Выбор данной температуры был сделан на основании наших предварительных исследований влияния температурно-временного режима вжигания пленок на структурные особенности изучаемых в данной работе составов керамики. Было установлено, что дополнительная термообработка при 850°C не изменяет структурных характеристик сформированных спеканием шпинелей состава 1 и 2 и существенно способствует формированию кубической шпинели в керамике состава 3 [13]. Для сравнения электрических параметров толсто пленочных ТР и контрольных образцов дисковых ТР режим металлизации последних соответствовал режиму вжигания толстых пленок.

Фазовый состав и кристаллическую структуру фаз определяли методом порошка с использованием рентгендифрактометра НЗГ-4а ($Fe_{K\alpha}$ -излучение). Микроструктурные особенности толстых пленок изучали с помощью электронного микроскопа LEO 982.

Электрическое сопротивление пленок измеряли в температурном диапазоне $-30...+170^\circ C$ с помощью цифровых вольтметров, используя климатические камеры MINI SABZERO (модель MC-71) и НРС 222. Удельное объемное электросопротивление ρ_V ТР дискового типа определяли по сопротивлению R_{25} при $25\pm 0,1^\circ C$ с учетом геометрических характеристик дисков, измеренных с помощью микрометра. Электрические параметры толсто пленочных ТР рассчитывали без учета краевых эффектов, принимая во внимание геометрические характеристики, измеренные

с использованием профилометра-профилографа ДЕКТЭК. Вольт-амперные характеристики измеряли для двухслойных пленочных ТР при $T=25\pm 0,1^\circ C$, используя цифровые мультиметры.

Тепловую константу (термочувствительность) $B_{25/85}$ (К) объемных и толсто пленочных ТР определяли по формуле

$$B_{25/85}=1778 \cdot \ln(R_{25}/R_{85}),$$

где R_{25} и R_{85} — сопротивление при 25 и $85\pm 0,1^\circ C$, соответственно.

ТКС α ($\%/^\circ C$) при $25\pm 0,1^\circ C$ определялся из отношения $-B_{25/85}/T^2$.

Результаты определения фазового состава объемной керамики и толсто пленочных слоев представлены в табл. 1. Керамика состава 1 и толстые пленки на ее основе содержат одну кристаллическую фазу — кубическую шпинель. Керамика состава 2 наряду с основной фазой шпинели содержит следы дополнительной фазы — оксида никеля. Дополнительная фаза полностью исчезает в процессе вжигания пленок. Керамика состава 3, помимо основной фазы шпинели, содержит в небольших количествах две фазы оксидов марганца — Mn_2O_3 и Mn_3O_4 . Соответствующие толстые пленки проявляют следы только одного из оксидов — Mn_2O_3 , т. е. процесс вжигания терморезистивных слоев способствует дальнейшему протеканию реакций формирования фазы шпинели в базовой керамике состава 3.

Таким образом, результаты рентгенофазового анализа установили однофазный состав пленок на основе керамики 1 и 2 и почти однофазный состав (с ничтожным количеством примеси оксида марганца) пленок на основе керамики 3. Необходимо отметить, что дифрактограммы всех исследованных толстых пленок проявляют также рефлексы и от материала подложки $\alpha-Al_2O_3$, пространственная группа (пр. гр.) $R-3c$.

Микроструктура толсто пленочных слоев выявляет зерна керамической составляющей, «окутанные» стеклофазой, и поры. Толстые пленки на базе керамики состава 1 и 2 характеризуются большей плотностью и микроструктурной однородностью (более однородным распределением составляющих — керамики, стеклофазы и пор) по сравнению с пленками из керамики состава 3.

Удельное объемное электросопротивление исследуемых пленочных ТР находится в диапазоне

Таблица 2
Характеристики объемных и толсто пленочных ТР

| Номер состава | Объемные ТР | | Толсто пленочные ТР | |
|---------------|-----------------|-----------------|---------------------|------------------------------------|
| | ρ_V , Ом·м | $B_{25/85}$, К | ρ_V , Ом·м | $B_{25/85}$, К (α , %/°C) |
| 1 | 1,7 | 3460 | 33,0 | 3690 (-4,16) |
| 2 | 2,5 | 3260 | 28,8 | 3540 (-3,99) |
| 3 | 0,03 | 1680 | 1,5 | 2980 (-3,36) |

1,5...33 Ом·м (табл. 2). Причем значения ρ_V толстых пленок значительно выше, чем объемных ТР того же состава. Так, ρ_V толстых пленок на основе керамики 1 и 2 превышает ρ_V дисковых ТР приблизительно на порядок, а пленок на основе керамики 3 — примерно на два порядка. Полученные данные свидетельствуют, что электрические свойства толстых пленок определяются свойствами не только поликристаллической фазы полупроводника (в данном случае шпинели различного состава — $\text{Cu}_{0,1}\text{Ni}_{0,1}\text{Co}_{1,6}\text{Mn}_{1,2}\text{O}_4$, $\text{Cu}_{0,1}\text{Ni}_{0,8}\text{Co}_{0,2}\text{Mn}_{1,9}\text{O}_4$ и $\text{Cu}_{0,8}\text{Ni}_{0,1}\text{Co}_{0,2}\text{Mn}_{1,9}\text{O}_4$), но и стеклофазы. Порошок стекла в составе терморезистивной пасты в процессе вжигания обволакивает поликристаллы шпинели и формирует диэлектрические прослойки стеклофазы между керамическими зёрнами, тем самым препятствуя процессам электропереноса в толстой пленке. Как результат, наблюдается существенное увеличение ρ_V пленочных ТР по сравнению с объемными ТР. Меньшее значение возрастания ρ_V пленочных ТР из керамики 1 и 2 в сравнении с таковыми из керамики 3 связано, по-видимому, с меньшей плотностью и микроструктурной неоднородностью терморезистивных слоев последних.

Электросопротивление толсто пленочных ТР в исследованном температурном диапазоне приблизительно описывается экспоненциальной зависимостью (рис. 1). Значения $B_{25/85}$ составляют 2980—3690 К в зависимости

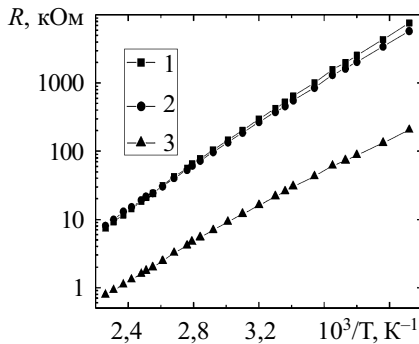


Рис. 1. Температурная зависимость электросопротивления толсто пленочных ТР на основе базовой керамики состава 1, 2 и 3

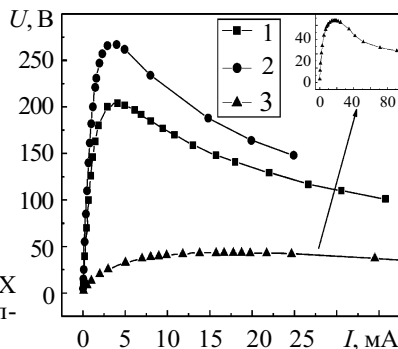


Рис. 2. Типичные ВАХ исследованных толсто пленочных ТР

сти от состава керамики, использованной для приготовления пленочных ТР, и превышают значения $B_{25/85}$ объемных ТР того же состава (см. табл. 2). Причем пленки на основе шпинелей $\text{Cu}_{0,1}\text{Ni}_{0,1}\text{Co}_{1,6}\text{Mn}_{1,2}\text{O}_4$ и $\text{Cu}_{0,1}\text{Ni}_{0,8}\text{Co}_{0,2}\text{Mn}_{1,9}\text{O}_4$ обладают более высокой, в сравнении с пленками на основе шпинели $\text{Cu}_{0,8}\text{Ni}_{0,1}\text{Co}_{0,2}\text{Mn}_{1,9}\text{O}_4$, термочувствительностью: значения тепловой константы $B_{25/85} \geq 3540$ К (соответствующие значения отрицательного ТКС $\alpha \geq 4,0$ %/°C). Типичные вольт-амперные характеристики исследованных толсто пленочных ТР представлены на рис. 2.

Таким образом, изготовлены новые толсто пленочные терморезисторы методом трафаретной печати стеклосодержащих терморезистивных паст на основе базовой керамики со структурой шпинели в системе $\text{Cu}_x\text{Ni}_{1-x-y}\text{Co}_y\text{Mn}_{2-y}\text{O}_4$. Варьирование состава базовой шпинели позволяет получать пленочные ТР с удельным объемным электросопротивлением в диапазоне 1,5—33 Ом·м и тепловой константой $B_{25/85}$ 2980—3690 К.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Пат. 47534 UA. Терморезистивный материал / М. М. Ваків, І. В. Гадзаман, А. П. Ковальський та ін.— 2002.— Бюл. № 7.
2. Setter N. Electroceramics: looking ahead // J. Eur. Ceram. Soc.— 2001.— Vol. 21.— P. 1279—1293.
3. Ikegami A., Arima H., Tosaki H. et al. Thick-film thermistor and its applications // IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology.— 1980.— Vol. CHMT-3, N 4.— P. 541—550.
4. Захаров В. И., Олеск А. О. Пленочные терморезисторы // Зарубежная электронная техника.— 1983.— № 5.— С. 43—74.
5. Захаров В. И., Олеск А. О. Материалы и технология изготовления толсто пленочных терморезисторов с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления // Электронная техника. Сер. Радиодетали и радиокомпоненты.— 1989.— № 3.— С. 30—34.
6. Захаров В. И., Кононюк И. Ф., Никифорова Н. А. Композиционные оксидно-полупроводниковые терморезистивные материалы с пониженной температурой спекания // Там же.— 1989.— № 1.— С. 19—22.
7. Захаров В. И., Олеск А. О., Ситников Б. И., Шефтель И. Т. Толсто пленочные терморезисторы // Там же.— 1984.— № 1.— С. 16—19.
8. Захаров В. И., Будим Н. И., Гиндин Е. И., Олеск А. О. Фазовый состав и электропроводность терморезистивного материала системы MnO-CoO-NiO-O_2 // Неорганические материалы.— 1990.— Т. 26, № 5.— С. 1011—1016.
9. Schmidt R., Stiegelschmitt A., Roosen A., Brinkman A. W. Preparation and performance of thick film NTC thermistors // Key Engineering Materials.— 2002.— Vol. 206—213.— P. 1417—1420.
10. Шпотюк О. И., Гадзаман І. В., Охримович Р. В. и др. Использование керамики на основе твердых растворов $(\text{Ni,Co,Mn,Cu})_3\text{O}_4$ для толсто пленочных терморезисторов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2002.— № 4—5.— С. 55—57.
11. Бодак О. І., Аксельруд Л. Г., Котур Б. Я. та ін. Кристалічна структура та електричні властивості кераміки $\text{Cu}_{0,1}\text{Ni}_{0,1}\text{Co}_{1,6}\text{Mn}_{1,2}\text{O}_4$ // УХЖ.— 2003.— Т. 67, № 4.— С. 89—91.
12. Mrooz O., Hadzaman I., Shpotyuk O. et al. Technological modification of $\text{Cu}_{0,1}\text{Ni}_{0,1}\text{Co}_{1,6}\text{Mn}_{1,2}\text{O}_4$ spinel-based ceramics // Вісник Львів. ун-ту. Сер. Хім.— 2002.— Вип. 41.— С. 107—114.
13. Mrooz O., Hadzaman I., Shpotyuk O. et al. Crystal structure and electrical properties of $\text{Cu}_{0,8}\text{Ni}_{0,1}\text{Co}_{0,2}\text{Mn}_{1,9}\text{O}_4$ electroceramics / VIII International Conf. on Crystal Chemistry of Intermetallic Compounds.— Lviv (Ukraine).— 2002.— P. 147.

Ласкаво просимо!

ПТА-УКРАИНА -2005-

ВЫСТАВКА

оборудования и технологий
для промышленной автоматизации
и встраиваемых систем

Киев 29 ноября - 2 декабря

Международный выставочный центр, Броварской проспект, 15

03150, Украина, Киев-150, а/я 585, тел.: +380 44 522 9471
E-mail: info@pta-expo.com.ua, web: www.pta-expo.com.ua
ООО «ЭКСПОТРОНИКА»



Санкт-Петербург, Ленэкспо,
14-17 февраля 2006 года

Electron Expo

идеальный контакт

Второй форум для профессиональных
разработчиков, производителей
и поставщиков электронной
аппаратуры и компонентов.



Мы делаем идеальные контакты возможными!
www.electronexpo.ru

Издательский дом «Мир Электроники»
представляет новый проект

Первый украинский
полномасштабный отраслевой каталог
«ЭЛЕКТРОНИКА УКРАИНЫ – 2006»

ежегодное
информационно-справочное
издание

Тел. (044)442-20-67
ec@optima.com.ua

Вы
можете
приобрести
новую
книгу

Смолюцкий С. М., Филиппов Л. И. Три шага к профессии: наука, диссертация, педагогика. — Одесса: «Нептун-Технология», 2005. — 128 с.; ил. 4, табл. 1.
Цена 3\$ (без стоимости доставки)

Авторы работы показывают, что выполнение любого научного исследования, подготовку научных статей, отчетов и написание диссертации следует производить в определенной логической последовательности действий, которую можно назвать алгоритмом научного исследования. При этом указывается не только то, что следует сделать, но и как, какими средствами. Авторы указывают пути приобретения мастерства и в педагогической деятельности, реализующейся на грани знаний и искусства.

Книга предназначена, в основном, для молодых исследователей, соискателей ученых степеней магистра и кандидата наук и начинающих педагогов вузов.

Справки по e-mail: tkca@odessa.net и по тел. (048) 728-18-50.



Пишите
Подписывайтесь
Читайте



Номер готовили
Березники, Днепрпетровск, Дрогобыч, Киев,
Львов, Минск, Москва, Одесса, Санкт-Петербург,
Ташкент, Харьков, Черкассы, Черновцы.