

ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ



НИИ «Орион»

Малошумящий высокостабильный генераторный модуль МЗ11009

Предназначен для использования в качестве гетеродина приемных устройств, а также частотозадающего элемента приемопередающих устройств в составе радиоэлектронной аппаратуры, систем и комплексов различного назначения.

В качестве активного элемента в генераторах используются GaAs-диоды Ганна, разработанные и изготовленные на технологической линии НИИ «Орион» (см. 4-ю стр. обложки).



Украина, 03680, г. Киев-057, ул. Э. Потье, 8а
Тел.: (044) 456-9164; Факс: (044) 456-5291; orion@ri-orion.kiev.ua



2(86) 2010

МТР

материалов и технологий

НАНОТЕХНОЛОГИИ,
МЕТРОЛОГИЯ,
СТАНДАРТИЗАЦИЯ
И СЕРТИФИКАЦИЯ
В ТЕРМИНАХ
И ОПРЕДЕЛЕНИЯХ



ТЕХНОСФЕРА

ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ под редакцией М. В. Ковальчука и П. А. Тодуа

- Основные понятия;
- основные физические, химические и биологические явления и понятия в нанотехнологиях;
- объекты нанотехнологий;
- основные процессы в нанотехнологиях;
- методы и средства исследования нанообъектов;
- метрология, стандартизация, сертификация;
- информатика, электроника, квантовые компьютеры;
- указатель терминов на русском языке;
- указатель терминов на английском языке;
- международные, региональные и зарубежные национальные организации в области стандартизации, метрологии и сертификации, научные общества и организации;
- список распространенных англоязычных сокращений

Москва: Техносфера, 2009.— 136 с.

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

Выходит один раз в 2 месяца

Регистрационный номер КВ 13418-2302ПР

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

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



ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

- В Украине** Отделения связи. «Каталог видань України». Индекс 23785.
Подписное агентство «Идея», www.idea.com.ua. Индекс 11146.
Подписное агентство «KSS», www.kss.kiev.ua. Индекс 20363.
- В России** Отделения связи. Каталог «Газеты и журналы». Индекс 71141.
- В Белоруссии** Отделения связи. Каталог «Издания стран СНГ». Индекс 71141.
- В редакции «ТКЭА»** можно подписаться с любого номера.

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

E-mail: tkea@optima.com.ua, web-сайт: www.tkea.com.ua,
тел. +38 (048)728-18-50, 728-11-89,
тел./факс 728-49-46.

Редакция: Е. А. Тихонова, А. А. Ефименко, Н. М. Колганова,
М. Г. Микулинская, М. С. Назарова.

Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корещук.

Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.

Журнал издается при поддержке
НПП «Карат» (г. Львов),
ЦКБ «Ритм» (г. Черновцы)

Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.
Печ. л. 8,0+1,0. Уч.-изд. л. 10,9. Тираж 500 экз. Заказ № 92.
Издательство «Политехперіодика»
(65044, г. Одесса-44, а/я 17).
Отпечатано в типографии издательства «ART-V»
(65091, г. Одесса, ул. Комитетская, 24а).

**ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2010 № 2 (86)

Год издания 34-й

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К.т.н. В. М. Чмиль

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

К.т.н. Н. М. Вакив (г. Львов)
Д.т.н. В. Н. Годованюк (г. Черновцы)
К.т.н. А. А. Дашиковский (г. Киев)
Н. В. Кончиц (г. Киев)
Д.т.н. В. П. Малахов (г. Одесса)
Д.ф.-м.н. В. Ф. Мачулин (г. Киев)
Д.т.н. М. К. Можар (г. Киев)
В. А. Проценко (г. Киев)
Е. А. Тихонова (г. Одесса)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д.т.н. С. Г. Антошук (г. Одесса)
Д.т.н. А. А. Ащеулов (г. Черновцы)
Д.т.н. В. В. Баранов (г. Минск)
К.т.н. Э. Н. Глушеченко,
зам. гл. редактора (г. Киев)
Д.т.н. В. В. Данилов (г. Донецк)
Д.т.н. В. Т. Дейнега (г. Одесса)
Д.ф.-м.н. В. А. Дроздов (г. Одесса)
К.т.н. И. Н. Еримичой,
зам. гл. редактора (г. Одесса)
К.т.н. А. А. Ефименко,
ответственный секретарь (г. Одесса)
Д.ф.-м.н. Д. В. Корбутяк (г. Киев)
Д.т.н. С. Ю. Лузин (г. С.-Петербург)
К.т.н. И. Л. Михеева (г. Киев)
Д.т.н. Ю. Е. Николаенко (г. Киев)
Д.ф.-м.н. В. В. Новиков (г. Одесса)
К.ф.-м.н. А. В. Рыбка (г. Харьков)
К.т.н. В. В. Рюхтин (г. Черновцы)
Д. ф.-м. н. М. И. Самойлович (г. Москва)
Д.т.н. В. С. Ситников (г. Одесса)
Д.х.н. В. Н. Томашик (г. Киев)
Д.ф.-м.н. О. И. Шпотюк (г. Львов)

УЧРЕДИТЕЛИ

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

Одобрено к печати Ученым советом ОНПУ
(Протокол № 7 от 23.03 2010 г.)

Техническая политика

Обзор результатов работ по развитию конкурентоспособных направлений микроэлектроники, выполненных в 2007—2009 гг. в рамках Государственной программы. *Падалко В. Г., Николаенко Ю. Е., Высоцкий А. Н., Кончиц Н. В.*

3

Современные электронные технологии

Модуль солнечных батарей на основе соединений A_3B_5 с концентраторами солнечной энергии и системой теплоотвода. *Вакив М. М., Круковский С. И., Николаенко Ю. Е., Круковский Р. С., Тимчишин В. Р., Сыворотка Н. Я.*
Выбор предпочтительных слоев для проводников при трассировке многослойных печатных плат. *Петросян Г. С., Полубасов О. Б.*

10

14

Новые компоненты для электронной аппаратуры

Фотодиод ультрафиолетового диапазона на основе селенида цинка. *Перевертало В. Л., Добровольский Ю. Г., Попов В. М., Поканевич А. П., Мацкевич В. М., Рыжиков В. Д., Шабашкевич Б. Г., Юрьев В. Г.*

17

Электронные средства: исследования, разработки

Оптимальный выбор стандартных несущих конструкций для электронных средств. *Ефименко А. А., Вильчинский А. И.*

22

Системы передачи и обработки сигналов

Способ искажения информации о радиолокационных характеристиках объектов. *Василевский В. В., Головань В. Г., Головань А. В., Дроздов М. А., Хиженяк Т. А.*

28

Функциональная микро- и нанoeлектроника

Получение арсенид-галлиевых структур силовых биполярных и полевых транзисторов методом газовой фазной эпитаксии. *Воронин В. А., Губа С. К., Курило И. В.*

31

Обеспечение тепловых режимов

Исследование характеристик щелевого теплообменника с развитой поверхностью теплообмена. *Малкин Э. С., Николаенко Ю. Е., Дьячков М. И., Николаенко Т. Ю.*

36

Технологические процессы и оборудование

Микроволновая обработка диэлектрических материалов в нерезонансных системах. *Демьянчук Б. А.*

40

Волоконно-оптические демультиплексоры для систем передачи информации. *Дементьев С. Г., Ключник Н. Т., Кузнецов В. А., Яковлев М. Я.*

43

Тенденции развития средств создания и анализа безмасляного вакуума. *Васильев Ю. К., Нестеров С. Б., Васильева Т. С.*

47

Широкоапертурный высокочастотный источник ионов низкой энергии с электронной компенсацией. *Дудин С. В., Рафальский Д. В., Зыков А. В.*

52

Фотоэлектростимулированная пассивация спектрометрических $Cd_{1-x}Zn_xTe$ -детекторов. *Загоруйко Ю. А., Христьян В. А., Федоренко О. А.*

56

Материалы электроники

Газочувствительные элементы на основе пленок $SiPcCl_2$. *Алиева Х. С., Сулейманов С. С., Муриудли М. Н.*

58

К истории науки и техники

80 лет со дня основания Московского энергетического института. *Бога-тырев Е. А., Смольский С. М.*

62

Библиография

Новые книги
В портфеле редакции

35, 46, 61, 2-я стр. обл.

51

ЗМІСТ

Технічна політика

Огляд результатів робіт з розвитку конкурентоспроможних напрямків мікроелектроніки, виконаних в 2007—2009 рр. у рамках Державної програми. *Падалко В. Г., Ніколаєнко Ю. Є., Висоцький О. М., Кончиць М. В.* (3)

Сучасні електронні технології

Модуль сонячних батарей на основі сполук A_3B_3 з концентраторами сонячної енергії та системою тепловідведення. *Ваків М. М., Круковський С. І., Ніколаєнко Ю. Є., Круковський Р. С., Тимчишин В. Р., Сиворотка Н. Я.* (10)

Вибір переважних шарів для провідників при трасуванні багатошарових друкованих плат. *Петросян Г. С., Полубасов О. Б.* (14)

Нові компоненти для електронної апаратури

Фотодіод ультрафіолетового діапазону на основі селеніду цинку. *Перевертайло В. Л., Добровольський Ю. Г., Попов В. М., Pokanevich A. P., Мацкевич В. М., Рижиков В. Д., Шабашкевич Б. Г., Юрьев В. Г.* (17)

Електронні засоби: дослідження, розробки

Оптимальний вибір стандартних несучих конструкцій для електронних засобів. *Єфіменко А. А., Вільчинський А. І.* (22)

Системи передачі і обробки сигналів

Спосіб створення інформації про радіолокаційні характеристики об'єктів. *Василевський В. В., Головань В. Г., Головань А. В., Дроздов М. О., Хиженяк Т. А.* (28)

Функціональна мікро- та наноелектроніка

Отримання арсенід-галієвих структур силових біполярних і польових транзисторів методом газозфазної епітаксії. *Воронін В. О., Губа С. К., Курило І. В.* (31)

Забезпечення теплових режимів

Дослідження характеристик щільного теплообмінника з розвинutoю поверхнею теплообміну. *Малкін Е. С., Ніколаєнко Ю. Є., Дьячков М. І., Ніколаєнко Т. Ю.* (36)

Технологічні процеси та обладнання

Мікрохвильова обробка діелектричних матеріалів в нерезонансних системах. *Дем'янчук Б. О.* (40)

Волоконно-оптичні демультиплексори для систем передачі інформації. *Демет'єв С. Г., Ключник М. Т., Кузнєцов В. А., Яковлев М. Я.* (43)

Тенденція розвитку засобів створення і аналізу безмасляного вакууму. *Васильєв Ю. К., Нестеров С. Б., Васильєва Т. С.* (47)

Широкоапертурне високочастотне джерело іонів низької енергії з електронною компенсацією. *Дудін С. В., Рафальський Д. В., Зиков О. В.* (52)

Фотоелектростимульована пасивація спектрометричних $Cd_{1-x}Zn_x$ Те-детекторів. *Загоруйко Ю. А., Христ'ян В. А., Федоренко О. О.* (56)

Матеріали електроніки

Газочутливі елементи на основі плівок $SiPcCl_2$. *Алієва Х. С., Сулейманов С. С., Муришудлі М. Н.* (58)

До історії науки і техніки

80 років з дня заснування Московського енергетичного інституту. *Богатир'єв Е. А., Смольський С. М.* (62)

CONTENT

Technical politic

The review of work results in the field of the competitive microelectronics branches development, achieved in 2007—2009 years according to the Government industry development program. *Padalko V. G., Nikolaenko Yu. E., Vysotskiy O. M., Kontchyts N. W.* (3)

Modern electronic technologies

Sun batteries module based on A_3B_3 compounds with concentrators of sun energy and system of heatsink. *Vakiv M., Krukovsky R., Timchishin V., Syvorotka N.* (10)

Selecting of preferred layers for routing on multi-layer printed circuit boards. *Petrosjan G. S., Polubasov O. B.* (14)

New components for the electronic equipment

The photodiode of UV-range on the basis of ZnSe. *Perevertailo V. L., Dobrovol'skiy Yu. G., Popov V. M., Pokanevich A. P., Matskevich V. M., Pizhikov V. D., Shabashkevich B. G., Yur'yev V. G.* (17)

Electronic means: investigations, development

Optimum choice of standard bearings constructions for electronic facilities. *Efimenko A. A., Vil'chinskiy A. I.* (22)

Systems of transfer and processing of signals

The method of the radar-tracking characteristics information distortion. *Vasilevsky V. V., Golovan V. G., Golovan A. V., Drozdov M. A., Hijnyak T. A.* (28)

Functional micro- and nanoelectronics

Producing of pover GaAs structures of bipolar and field-effect transistor by CVD-method. *Voronin V. A., Guba S. K., Kurilo I. V.* (31)

Ensuring of thermal modes

Research of characteristics slot-hole heat exchanger with the developed surface of heat exchange. *Malkin E. C., Nikolaenko Yu. E., Djachkov M. I., Nikolaienko T. Yu.* (36)

Technological processes and equipment

Microwave treatment of dielectric materials in non-resonant systems. *Demyanchuk B. A.* (40)

Optical fibre demultiplexers for systems of the information transfer. *Dement'ev S. G., Klyuchnik N. T., Kuznetsov V. A., Yakovlev M. Ya.* (43)

New trends in oil free vacuum generation equipment. *Vasiliev Yu. K., Nesterov S. B., Vasilieva T. S.* (47)

RF broad-beam low-energy ion source with electron compensation. *Dudin S. V., Rafalskiy D. V., Zikov A. V.* (52)

Photoelectrostimulated passivation of spectrometric $Cd_{1-x}Zn_x$ Te-detectors. *Zagoruiko Yu. A., Khristyan V. A., Fedorenko O. A.* (56)

Materials of electronics

Gasosensing elements on the base of $SiPcCl_2$ films. *Alieva Kh. S., Sulejmanov S. S., Murshudli M. N.* (58)

To a history of science and engineering

80th anniversary of Moscow Power Engineering Institute. *Bogatyr'ev E. A., Smolskiy S. M.* (62)

В. Г. ПАДАЛКО, д.т.н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО,
А. Н. ВЫСОЦКИЙ, Н. В. КОНЧИЦ

Украина, г. Киев, Минпромполитики Украины
E-mail: nikola@industry.gov.ua

ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТ ПО РАЗВИТИЮ КОНКУРЕНТОСПОСОБНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ, ВЫПОЛНЕННЫХ В 2007—2009 гг. В РАМКАХ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОГРАММЫ

Приведены основные технические характеристики научно-технической продукции, созданной в рамках Государственной программы развития промышленности на 2003—2011 годы в области микроэлектроники.

Выполнение работ, направленных на развитие наиболее конкурентоспособных направлений микроэлектроники в Украине, в рамках Государственной программы развития промышленности осуществляется по следующим направлениям:

- материалы для микроэлектроники;
- функциональная микроэлектроника;
- энергетическая микроэлектроника;
- сенсоелектроника;
- новое технологическое оборудование для микроэлектроники;
- интегральные схемы и полупроводниковые приборы.

Комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, которые выполнялись в 2007—2009 годах, направлен на разработку конкурентоспособных изделий микроэлектроники на основе новых материалов, в частности карбиде кремния, фосфиде индия, на алмазе и т. п., что позволяет повысить рабочую температуру элементов до 400°C, уровень пробивного напряжения до 1000—2000 В, увеличить мощность генераторных модулей в 1,5—4 раза, повысить чувствительность радиолокационных устройств и т. п.

Материалы для микроэлектроники

НИР «Разработка технологии изготовления гетероструктур на основе InP для диодов Ганна», НПП «Карат», г. Львов.

Впервые в Украине разработаны физико-химические принципы технологии выращивания чистых эпитаксиальных слоев i -InP, являющихся активными слоями в составе гетероструктур для диодов Ганна с повышенной частотой генерации и высокой надежностью.

В основу проведения работы был положен предложенный в [1] способ получения высококачественных гетероструктур n^+ -InP/ n -InP для диодов Ганна с низкой концентрацией дефектов и высокой подвижностью электронов в активном слое, основанный на применении комплексного легирования слоев InP

редкоземельными и изовалентными элементами Al и Yb в специально подобранных пропорциях. Эпитаксиальные слои InP, полученные таким способом, являются некомпенсированными и обладают низкой концентрацией фоновых примесей и высокой подвижностью электронов. При этом эффект «очистки» эпитаксиальных слоев проявляется при незначительных концентрациях легирующих элементов (Yb), что уменьшает вероятность загрязнения эпитаксиального слоя неконтролируемыми примесями из легирующего материала.

Полученные гетероструктуры n^+ -InP/ n -InP по своим техническим характеристикам отвечают лучшим мировым образцам (табл. 1).

Таблица 1
Характеристики гетероструктуры n^+ -InP/ n -InP

Концентрация электронов, см^{-3}	
в подложке n^{++} -InP	$(3-5) \cdot 10^{18}$
в буферном слое n_0^+ -InP	$(1-3) \cdot 10^{18}$
в активном слое i -InP, не больше	$1 \cdot 10^{16}$
в контактном слое n_k^+ -InP	$(1-3) \cdot 10^{18}$
Подвижность электронов, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	>17000 (77 K)
Толщина активного слоя, мкм	1—2
Площадь гетероструктуры, см^2 , не меньше	10,0

Для промышленного использования результатов работы планируется разработка базового технологического промышленного процесса производства гетероструктур n^+ -InP/ n -InP для диодов Ганна с дальнейшим внедрением его в серийное производство на технологической базе НПП «Карат».

НИР «Разработка методов выявления и идентификации электрически активных дефектов в полупроводниковых материалах и структурах для создания высоконадежных и конкурентоспособных изделий микроэлектроники», НИИ микроприборов НТК «Институт монокристаллов» НАНУ, г. Киев.

Для выявления электрически активных дефектов (ЭАД) в материалах и технологических структурах на разных технологических этапах изготовления приборов микроэлектроники создан комплекс из пяти специализированных методик:

1) выявления и визуализации ЭАД в структурах Si-SiO₂ со сверхтонким диэлектриком при изготовлении интегральных схем;

2) выявления локальных источников тепловыделения („горячих точек”) в кристаллах изделий микроэлектроники на основании визуализации локальной холестерической фазы в смектической фазе холестерических жидких кристаллов;

3) определения ЭАД в приповерхностных слоях кремния, в т. ч. в сверхтонких $p-n$ -переходах, на основе оптического (лазерного) зонда;

4) определения распределения и концентрации ЭАД в технологических МДП-структурах на основе растровой электронной микроскопии;

5) исследования ЭАД в приповерхностном слое кремния в области канала МДП-транзисторов на основе емкостной релаксационной спектроскопии глубоких уровней.

Эти методики внедрены в Центре «Микроаналитика» НИИ микроприборов на этапах разработки технологии приборов. Их использование на предприятиях, которые изготавливают изделия микроэлектроники, требующие углубленного контроля технологических структур и процессов, позволит значительно улучшить технико-экономические показатели современных изделий микроэлектроники, повысить их надежность и конкурентоспособность микроэлектронных компонентов [2—5].

НИР «Разработка и исследование технологии получения пленочных катодолюминесцентных структур для дисплеев с высокой разрешающей способностью», НИИ «Гелий», г. Винница.

Предложен и исследован новый способ получения пленочных катодолюминесцентных структур состава $ZnS:Cu.Ga$ и $ZnO:Cu.Ga$ для создания информационных систем высококачественного отображения [6, 7]. Основными этапами разработанной технологии являются электронно-лучевое нанесение в вакууме пленок $Zn:Cu$ и дальнейший их отжиг с одновременным легированием Ga в атмосфере, содержащей серу или кислород.

Технический уровень полученных структур (табл. 2) отвечает уровню продукции таких ведущих фирм как Dai Nippon Toryo (Япония), Philips Corporation (Нидерланды), Fataba Denshi Kogyo (Япония).

Разработанная технология получения пленочных катодолюминесцентных структур использована в НИИ «Гелий» в производстве жидкостно-кристаллических индикаторов с повышенной разрешающей способностью.

ческих индикаторов с повышенной разрешающей способностью.

Функциональная микроэлектроника

ОКР «Разработка конструкции и технологии изготовления арсенид-галлиевых смесительных и детекторных диодов на кристаллодержателе для радиотехнических устройств диапазона частот (3...80) ГГц», НПП «Сатурн», г. Киев.

Выполнена разработка, а также освоено производство диодов СВЧ, которые не имеют аналогов в странах СНГ [8, 9], что позволит избежать существующих технических и материальных трудностей, связанных с критическим импортом СВЧ-диодов миллиметрового диапазона.

Конструкция диода позволяет использовать его в высокочувствительных детекторных и преобразовательных устройствах как в интегральном (планарном), так и в волноводном варианте реализации. Повышение рабочей частоты диодов до 80 ГГц достигнуто за счет снижения паразитных параметров (емкости и индуктивности), а также потерь на скин-эффект путем выполнения кристалла СВЧ-диода в виде планарной меза-структуры с балочными выводами, смонтированными непосредственно на металлических выводах пленочного кристаллодержателя.

Жизнеспособность и стойкость диодов к внешним воздействиям — климатическим, механическим и другим (при работе в составе гибридных интегральных схем и микросборок радиотехнических приборов объемного исполнения) — обеспечивают возможность их эксплуатации в соответствии с ОСТ 11336.925-81.

По своим техническим характеристикам (табл. 3) разработанный диод отвечает уровню лучших современных российских аналогов, а именно смесительных диодов СВЧ 3А123 и СВЧ 3А117-6; детекторного диода НВЧ 3А206-6.

Таблица 3

*Технические характеристики диода СВЧ
АРКА.432131.002 (ТУ В 32.1-14308747-20:2009)*

Емкость диода, фФ, не больше	120
Емкость кристаллодержателя, фФ, не больше	70
Показатель идеальности ВАХ, не больше	1,2
Последовательное сопротивление потерь, Ом, не больше	8
Обратный ток при напряжении 3В, мкА, не больше	5
Габаритные размеры, мм, не больше	1,5×1,5×1,5
Масса образца, г, не больше	0,02

НИР «Разработка и исследование видеомониторов на плоских ЖК-панелях для авиационной техники», НИИ «Гелий», г. Винница.

Разработаны конструкция и технология изготовления экспериментальных образцов видеомониторов на жидкокристаллических панелях с широким рабочим температурным диапазоном и повышенной механической стойкостью (табл. 4) [10, 11].

Таблица 2

Характеристики пленочных катодолюминесцентных структур состава $ZnS:Cu.Ga$ и $ZnO:Cu.Ga$

Яркость свечения, кд/м ²	до 1000
Плотность тока при ускоряющем напряжении 50 кВ, мкА/см ²	до 70
Цвет излучения	зеленый
Длина волны, нм	520
Площадь образца, см ² , не менее	5,5
Толщина пленок, мкм	6—8
Разрешающая способность, линий/мм, не менее	100

Таблица 4
Основные параметры экспериментальных образцов видеомониторов

Габаритные размеры, мм	265×198×56,2
Масса, кг	2,2
Размер экрана по диагонали, дюйм, не менее количество пикселей	10,4 1024×768
Потребляемая мощность, Вт, не более	90
Температурный диапазон, °С	от –40 до +55
Напряжение питания, В	27
Угол обзора, градус по вертикали по горизонтали	от –10 до +35 от –50 до +50
Яркость изображения, кд/м ² , в режиме дневном, не менее ночном, не более	800 15

Использование таких видеомониторов в авиационной технике позволит значительно уменьшить вес и габариты бортовой аппаратуры, что повышает летные качества авиационного транспорта.

Энергетическая микроэлектроника

НИОТР «Разработка высокоэффективных концентраторных солнечных батарей на основе соединений A_3B_5 », НПП «Карат», г. Львов.

Разработана новая отечественная технология изготовления высокоэффективных гетероструктур GaAs/InGa/AlGaAs для работы при концентрированных (до 500 раз) световых потоках. На основе полученных гетероструктур изготовлен опытный образец модуля солнечной батареи с концентраторами солнечной энергии и высокоэффективной системой отвода тепла с тепловыми трубами [12, 13]. Его КПД достигает 28%, что соответствует мировому уровню. На основе разработанных модулей могут быть созданы концентраторные солнечные батареи, предназначенные для работы в составе высокоэффективных автономных систем энергообеспечения жилых и бытовых помещений, комбинированных систем уличного освещения, подсветки дорожных знаков и т. п.

ОКР «Разработка и внедрение высокоэффективных микроэлектронных элементов для энергосберегающих источников света с целью улучшения эксплуатационных характеристик», НИИ «Гелий», г. Винница.

Разработаны микроэлектронные элементы для дуговых электродов [14, 15] энергосберегающих источников света — дуговых ртутных ламп высокого давления с люминофорным покрытием [16], которые пригодны для работы в светильниках внешнего освещения и освещения производственных помещений. Внедрение в технологию изготовления дуговых электродов РАЛС 657719.008 с высокоэффективными микроэлектронными элементами позволяет увеличить продолжительность горения ламп до 5200 ч, что на 900 ч выше, чем для ламп-аналогов, при этом сни-

жение светового потока за время эксплуатации не превышает 20%.

Результаты ОКР будут использованы на Заводе газоразрядных ламп при серийном производстве ламп высокого давления типа ДРЛ 250 на основе дуговых электродов с высокоэффективными микроэлектронными элементами, которые уже поставляются в необходимых количествах НИИ «Гелий».

В рамках направления «Энергетическая микроэлектроника» проводятся следующие исследования, направленные на повышение эффективности теплоотвода в микроэлектронной аппаратуре.

НИР «Разработка конструкции и исследование технологических особенностей создания и рабочих характеристик крупноформатных термоэлектрических модулей с тепловыми трубами», Институт термоэлектричества НАНУ, г. Черновцы.

Для улучшения рабочих характеристик крупноформатных термоэлектрических модулей отрабатывается конструкция и технологические особенности создания экспериментальных образцов крупноформатных термоэлектрических модулей с тепловыми трубами в зонах подвода и отвода теплоты. Проведенные исследования основных рабочих характеристик таких модулей показали эффективность предлагаемой конструкции в сравнении с традиционными модулями тех же размеров без тепловых труб.

НИР «Исследование и разработка высокоэффективных теплообменников для мощных микропроцессоров», КНУСА, г. Киев.

Для проведения исследований изготовлены экспериментальные образцы водяных теплообменников с повышенной эффективностью [17] для отвода теплоты от мощных микропроцессоров (табл. 5).

Таблица 5
Основные технические характеристики экспериментальных образцов теплообменников

Плотность теплового потока на поверхности имитатора микропроцессора, Вт/см ²	от 20 до 100
Количество отводимой теплоты, Вт	от 60 до 600
Максимальная температура поверхности имитатора микропроцессора при температуре воды на входе в теплообменник 25°C, °C	+65
Гидродинамическое сопротивление теплообменника по воде, не более, кПа	6
Габаритные размеры (без учета длины штуцеров), не более, мм	55×55×20

НИР «Исследование теплопередающих свойств металлических подложек с замкнутым испарительно-конденсационным циклом для отвода тепла от тепловыделяющих элементов микроэлектронной аппаратуры», НПП «Карат», г. Львов.

Исследуется возможность эффективного отвода тепла от тепловыделяющих микроэлектронных элементов электронного блока [18] при их установке на охлаждающую пластину блока. Проводятся исследования для пластин размерами до 170×280 мм из различ-

ных материалов — меди, алюминия, титана или их сплавов при использовании в качестве теплоносителя воды, этанола или ацетона. Максимальная температура поверхности блока в зоне установки элементов составляет $+70^{\circ}\text{C}$, плотность теплового потока в зоне теплоподвода — до 5 Вт/см^2 .

Сенсоэлектроника

НИР «Разработка и исследование наноструктурированных пленок чувствительных элементов сенсоров влажности», НИИ «Гелий», г. Винница.

Впервые в Украине создана наноструктурированная композитная пленка [19] для практической разработки и производства интегральных сенсоров влажности [20] с высокой чувствительностью, стабильными во времени характеристиками, с линейной зависимостью емкости от относительной влажности практически во всем диапазоне изменения последней (от 3 до 100%). Такие сенсоры сохраняют работоспособность при низких температурах, вплоть до -35°C , что на данный момент невозможно обеспечить другими существующими материалами (пленки оксидов некоторых металлов, органические пленки и т. п.).

Полученные чувствительные элементы будут использованы в НИИ «Гелий» при изготовлении сенсоров влажности с функциональными параметрами для потребностей гидрометеорологии, медицины, промышленности, агропромышленного комплекса и бытовой электроники.

НИР «Разработка и исследование унифицированного акустоэлектронного преобразователя для сенсоров физических величин», Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова.

Разрабатывается унифицированный преобразователь на поверхностных акустических волнах — базовый элемент сенсоров целого ряда функциональных назначений [21]. Благодаря использованию достижений акустоэлектроники в разработанном унифицированном преобразователе существенно упрощается электрическое сопряжение сенсора с микропроцессорной техникой. Это обеспечит решение проблемы интеллектуализации сенсора и повышения метрологических и эксплуатационных характеристик.

Преобразователь состоит из чувствительного элемента и электронной схемы первичной обработки электрического сигнала, конструктивно выполненных в одном корпусе. Работа преобразователя исследуется на примере разработанного экспериментального образца сенсора угла поворота (табл. 6).

Таблица 6

Основные технические характеристики экспериментального образца сенсора угла поворота

Вид исходного сигнала	частотный
Диапазон рабочих частот, МГц	15,7—16,3
Угол поворота	40°
Погрешность измерения угла, не более	2'
Напряжение питания, В	10 ± 1

Новое технологическое оборудование для микроэлектроники

ОКР «Разработка аппаратуры и технологии термоэлектротренировки сверхмощных лавинно-пролетных диодов 8-миллиметрового диапазона импульсного режима работы», НИИ «Орион», г. Киев.

Впервые в СНГ создан стенд (см. табл. 7) для термоэлектротренировки импульсных лавинно-пролетных диодов (ЛПД) для диагностического обеспечения производства мощных кремниевых ЛПД миллиметрового диапазона [22] и технология термоэлектротренировки диодов на этом стенде.

Таблица 7

Основные технические характеристики стенда

Диапазон импульсного рабочего тока, А	5—22
Длительность импульса, нс	100—340
Диапазон напряжения импульса, В	10—70
Температура корпуса диода, $^{\circ}\text{C}$	20—100
Количество диодов, тестируемых одновременно, шт.	24

Внедрение стенда в НИИ «Орион» обеспечило повышение надежности производимых супермощных кремниевых ЛПД 8-мм диапазона, что позволило укрепить свои позиции на международном рынке.

НИР «Разработка методов и аппаратуры для диагностики надежности кремниевых сверхмощных импульсных ЛПД», Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАНУ, г. Киев.

Впервые в Украине разработана аппаратура [23, 24] и методы [25] для предварительной диагностики надежности ЛПД по особенностям их вольт-амперной характеристики на участке лавинного пробоя в импульсном режиме работы при напряжении до 100 В, токе до 20 А и длительности импульса 100 нс.

В комплексе с разработанной в НИИ «Орион», г. Киев, аппаратурой и технологией термоэлектротренировки сверхмощных импульсных ЛПД 8-мм диапазона они позволяют получать более полную информацию о параметрах таких ЛПД и ускорить процесс оптимизации технологического процесса производства за счет экспресс-диагностики.

НИР «Исследование способов увеличения времени жизни плазменных образований», НИИ «Гелий», г. Винница.

При использовании электрических разрядов в свободной атмосфере получены автономные долгоживущие плазменные образования с временем жизни 2 с, что соответствует мировому уровню. Разработаны рекомендации по созданию нетрадиционных источников энергии [26].

НИОКР «Разработка малогабаритного ВЧ-диодного реактора с распределенными напуском и откачкой газа для процессов плазмохимического травления с высокой равномерностью», Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина.

Осуществляется разработка и изготовление экспериментального образца малогабаритной малоэнер-

Таблица 8

Давление газа в зоне обработки, Па	1—500
Диаметр зоны обработки, мм, не менее	100
Диапазон энергии ионов, эВ	20—500
Максимальная скорость травления Si, мкм/мин	2—3
Однородность травления, %, не хуже	2
Работа с химически-активными радикалами	C _n F _m , O, N, F
Продолжительность работы (смесь Ag+O ₂ +CF ₄)	
беспрерывной, ч, не менее	8
без профилактики, ч, не менее	40
ВЧ-мощность, Вт	
номинальная	100
максимальная	300
Габаритные размеры (без вакуумного насоса), мм, не более	500×500×300

гоемкой настольной установки с ВЧ-диодным реактором для плазмохимического травления [27] с соблюдением условий высокой равномерности, основные технические характеристики которого приведены в табл. 8.

Планируется проведение испытаний экспериментального образца реактора с целью исследования процессов формирования потоков заряженных частиц, физических принципов согласования импедансов ВЧ-генератора и плазмохимического реактора диодного типа.

НИОКР «Разработка универсального источника ионов для малоэнергоёмкого ионно-радикального травления материалов микроэлектроники на базе комбинированного индукционно-емкостного ВЧ разряда», Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина.

Осуществляется разработка универсального источника ионов на базе индукционного разряда с высокочастотной диодной ионно-оптической системой, обеспечивающей независимое управление энергией и плотностью потока ионов при условии полной токовой компенсации, пригодного для малоэнергоёмкого ионно-радикального травления материалов микроэлектроники. Проводятся исследования процессов формирования потоков заряженных частиц в условиях токовой компенсации с независимым управлением энергией и плотностью потока ионов, а также физических принципов согласования импедансов высокочастотного генератора и источника ионов.

Источник ионов предназначен для внедрения в современных ионно-плазменных технологиях на предприятиях микроэлектроники Украины.

Интегральные схемы и полупроводниковые приборы

ОКР «Разработка микросхемы четырехканального микромощного операционного усилителя с полевыми транзисторами на входе», НПО «Кристалл», г. Киев

Создана интегральная микросхема четырехканального микромощного операционного усилителя с по-

Таблица 9

Технические характеристики интегральной микросхемы

Скорость нарастания исходного сигнала, В/мкс	9
Полоса частот, МГц	4
Входной ток, пА	10
Коэффициент усиления напряжения	40×10 ³
Ток питания, мкА/канал	210
Напряжение питания, В	от ±4,5 до ±18

левыми транзисторами на входе, характеристики которой (см. табл. 9) полностью соответствует микросхеме OP482 фирмы “Analog Devices”, США [28, 29]. Впервые в СНГ разработана совместная биполярная технология изготовления полевых транзисторов и плёночных резисторов с изоляцией встречносмещёнными *p-n*-переходами. При проектировании применена двухуровневая металлизация и функциональная подгонка напряжения смещения нуля методом испарения плавящихся алюминиевых перемычек.

Микросхема предназначена для применения в активных RC-фильтрах, интеграторах, измерительных усилителях, детекторах и других устройствах радиоэлектронной аппаратуры. Начиная с 2010 г. организовано серийное производство микросхем четырехканального микромощного операционного усилителя с полевыми транзисторами на входе УФ1101УД48 (в корпусе SO-14) и УР1101УД48 (в корпусе DIP-14) для потребностей предприятий Национального космического агентства Украины. На 2010 год запланировано изготовление этих микросхем в количестве соответственно около 37 и 10 тыс. шт.

ОКР «Разработка БИС для микроэлектронного координатно-чувствительного детектора (МКЧД) для приборов элементного анализа веществ», НИИ микроприборов НТК «Институт монокристаллов» НАНУ, г. Киев.

Разработана специализированная большая интегральная схема [30, 31] для аналитического приборостроения, которая по своему техническому уровню является лучшей в Украине и соответствует техническому уровню аналогичных микросхем, выпускаемых в России и Белоруссии. Изготовлена и испытана опытная партия микросхем.

Внедрение микросхемы планируется в ОАО «СЕЛ-МИ» и Институте прикладной физики НАНУ, г. Сумы, в перспективном приборе для анализа состава многоэлементных веществ в реальном масштабе времени.

*НИР «Разработка физико-технологических основ производства мощных быстродействующих высоковольтных 4HSiC *p-i-n*-диодов», НИИ «Орион», г. Киев.*

Созданы научно-технологические основы для практической разработки и серийного производства мощных быстродействующих высоковольтных (до 1000 В) карбид-кремниевых СВЧ *p-i-n*-диодов с диапазоном рабочей частоты до 40 ГГц при температуре до 400°C [32—35], серийного производства кото-

рых в данное время в мире нет. Использование таких диодов позволит создать новое поколение СВЧ мощных коммутирующих устройств, быстродействие которых будет в 3—5 раз выше в сравнении с устройствами на кремниевых $p-i-n$ -диодах, с рабочей температурой до 300°C.

НИИР «Исследование и разработка технологии изготовления диодов Ганна 3-мм диапазона с повышенными энергетическими характеристиками на основе фосфида индия», НИИ «Орион», г. Киев.

Впервые в СНГ разработаны базовые научные и конструкторско-технологические решения, обеспечивающие создание диодов Ганна из фосфида индия с повышенными энергетическими характеристиками с толщиной активного слоя 1,5—2,0 мкм в металлурбинных и металлокварцевых корпусах с диапазоном частоты 90—140 ГГц [36, 37]. На данном этапе изготовлены экспериментальные образцы диодов Ганна с катодным контактом, инжектирующим горячие электроны, и исследованы их СВЧ-характеристики. Далее планируется проведение ОТР по созданию серийного производства диодов Ганна 3-мм диапазона с повышенными энергетическими характеристиками на основе фосфида индия для новейших систем связи, навигации, радиолокации, медицины и аппаратуры специального назначения.

ОКР «Разработка конструкции и технологии изготовления сверхмощных до 30 Вт кремниевых лавинно-пролетных диодов 8-мм диапазона импульсного режима работы», НИИ «Орион», г. Киев.

Проводится разработка элементов гибридных СВЧ интегральных схем нового поколения для генерации и усиления СВЧ-мощности минимум до 30 Вт в импульсном режиме (продолжительность импульса рабочего тока — 100—280 нс, паузы между импульсами — 10—200 мкс) в диапазоне частот 33—35 ГГц

Таблица 10
Основные технические характеристики интегральной схемы

Номинальное значение напряжения питания, В	+5,0
Допустимые отклонения напряжения питания, %	±5
Исходное напряжение высокого уровня, не менее, В	–0,5
Исходное напряжение низкого уровня, не более, В	0,4
Входной ток низкого уровня по выводу IN, мкА, не менее	5—100
Исходный ток просачивания при низком уровне напряжения на выводе IN (режим «выключено», мкА	–10,0—10,0
Динамический ток потребления, мА при $C_L=15$ пФ в диапазоне частот	
от 1,0 до 19,999 МГц, не более	15
от 20,0 до 34,999 МГц, не более	20
от 35,0 до 70,0 МГц, не более	30
Диапазон рабочих температур, °C	от –60 до +85

[38] для применения в системах связи, радиолокации, навигации и аппаратуре специального назначения. Разработана рабочая конструкторская и технологическая документация для обеспечения гибкого производства сверхмощных кремниевых лавинно-пролетных диодов 8-мм диапазона импульсного режима работы.

ОКР «Разработка высокочастотных КМОП интегральных схем для генераторов с кварцевой стабилизацией частоты», НИИ микроприборов НТК «Институт монокристаллов» НАНУ, г. Киев.

Создается интегральная схема [39] для генерирования электрических импульсов в диапазоне частот от 1 до 70 МГц с подсоединением кварца на соответствующую частоту к КМОП ИС, а также управление входными напряжениями от ТТЛ интегральных схем наличием или отсутствием электрических импульсов на выходе интегральной схемы (табл. 10).

На протяжении 2007—2009 годов в рамках Государственной программы развития промышленности на 2003—2011 годы в области микроэлектроники выполнено 15 работ. Еще 8 работ, начатых в этот период, планируется завершить в 2010 году. По результатам разработок и исследований подано 23 заявки на выдачу патентов Украины на изобретения и полезные модели, по которым на данное время уже получено 11 патентов, рассмотрение других заявок продолжается. Опубликовано 20 научно-технических статей в специализированных изданиях Украины и сделано 11 докладов на международных научно-технических конференциях.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Круковский С. І. Легування рідкісноземельними та ізовалентними елементами / Автореф. дис. ... д. т. н. – Львівська політехніка. — 2005.
2. Попов В. М., Клименко А. С., Поканевич А. П. Усовершенствованный метод выявления «горячих точек» в изделиях микроэлектроники // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2008. — № 3. — С. 55—58
3. Попов В. М., Шустов Ю. М., Клименко А. С., Поканевич А. П. Влияние облучения кремния низкоэнергетическими ионами аргона на образование в нем электрически активных дефектов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 4. — С. 48—51.
4. Заявка № а2008 14889 від 24.12.2008 р на выдачу патенту України. Спосіб виявлення локальних електрично активних дефектів на поверхні напівпровідника в структурах «метал-діелектрик-напівпровідник» // ДП «НДІ мікроприладів» НТК «Інститут монокристалів» НАН України / В. М. Попов, А. С. Клименко, О. П. Поканевич.
5. Заявка № а2008 13387 на выдачу патенту України. Пристрій для візуального відображення електричних потенціалів і температури на поверхні кристала інтегральної мікросхеми // В. М. Попов, А. С. Клименко, О. П. Поканевич.
6. Патент 39999 України. Спосіб створення плівкових катодолінофорів // ДП НДІ «Гелій» / В. В. Севастьянов, Л. Ф. Коваленко, В. С. Хомченко та ін. — 2009. — Бюл. № 6.
7. Коваленко Л. Ф., Севастьянов В. В., Хомченко В. С., Цыркунов Ю. А. Получение эффективных катодоллюминесцентных структур на базе пленочной технологии // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2008. — № 6. — С. 48—49.

8. Патент 40563 України. Напівпровідниковий НВЧ-діод на кристалотримачі // ВІС «НВП «Сатурн» / В. В. Ткаченко, Е. М. Глушеченко, М. І. Урїн, С. В. Бобженко.— 2009.— Бюл. № 7.
9. Ткаченко В. В., Іжко Н. С., Угрин М. І. Арсенід-галієві діоди на кристаллодержателі для детекторів 5- і 8-мм діапазонів довжин волн // Техніка і прилади СВЧ.— 2008.— № 1.— С. 50—51.
10. Патент 39400 України. Резистивний нагрівач активноматричного рідкокристалічного дисплея // ДП НДІ «Гелій» / Л. Ф. Коваленко, В. С. Хомченко, І. Ю. Жураковський та ін.— 2009.— Бюл. № 4.
11. Коваленко Л. Ф., Жураковський І. Ю., Сташевський В. В., Севаст'янов В. В. Жидкокристалічні монітори для авіаційної техніки // Технологія і конструювання в електронній апаратурі.— 2009.— № 3.— С. 32—34.
12. Патент 43132 України. Спосіб отримання гетероструктури з варізонною активною областю // НВП «Карат» / М. М. Ваків, С. І. Круковський, Н. Я. Сиворотка.— 2009.— Бюл. № 15.
13. Ваків Н. М., Круковський С. І., Ніколаєнко Ю. Е. і др. Технологія і конструкція модуля сонячних батарей на основі з'єднання A_2B_5 з концентраторами сонячної енергії і висококоefficientивної системою теплоотвода // Технологія і конструювання в електронній апаратурі.— 2010.— № 2.— С. 10—13.
14. Севаст'янов В. В., Шутовський В. В. Висококоefficientивні катодні елементи для газорозрядних джерел світла // Технологія і конструювання в електронній апаратурі.— 2009.— № 1.— С. 59—60.
15. Патент 45837. Спосіб виготовлення дугових електродів для газорозрядних ламп високого тиску // ДП НДІ «Гелій» / В. В. Севаст'янов, В. В. Шутовський, М. М. Когут, В. І. Давиденко.— 2009.— Бюл. № 22.
16. Заявка № а2008 11840 від 06.10.2008 р. на видачу патенту України. Спосіб виготовлення газорозрядної лампи високого тиску // ДП НДІ «Гелій» / В. В. Севаст'янов, В. В. Шутовський, М. М. Когут.
17. Патент 48048 України. Рідинна система охолодження потужного електронного компонента // КНУБА / Е. С. Малкін, Ю. С. Ніколаєнко, І. Е. Фуртат, М. І. Дячков.— 2010.— Бюл. № 5.
18. Патент № 40635 України. Електронний блок // НВП «Карат» / Ю. С. Ніколаєнко, О. О. Циганський.— 2009.— Бюл. № 8.
19. Коваленко К. Л., Шаран Н. Н., Севаст'янов В. В. Наноструктуризована композитна плівка для сенсорів вологості // Технологія і конструювання в електронній апаратурі.— 2009.— № 5.— С. 49—50.
20. Заявка № u2009 03672 від 15.04.2009 р. на видачу патенту України. Інтегральний сенсор вологості // ДП НДІ «Гелій» / К. Л. Коваленко, М. М. Шаран, В. В. Севаст'янов.
21. Лепих Я. І. Датчик угла поворота генераторного типу з елементом на поверхневих акустических волнах // Технологія і конструювання в електронній апаратурі.— 2009.— № 3.— С. 24—25.
22. Заявка № а 2008 14794 від 22.12.2008 р. на видачу патенту України. Пристрій для випробувань НВЧ напівпровідникових діодів // ДП НДІ «Оріон» / М. С. Болтовець, Г. М. Веремійченко, В. Г. Ноєнко та ін.
23. Патент 43386 України. Апаратура для діагностики надійності напівпровідникових надпотужних і імпульсних лавиннопролітних діодів (ЛПД) // ІФН ім. В. Є. Лашкарьова / О. Є. Беляєв, М. С. Болтовець, Р. В. Конакова та ін.— 2010.— Бюл. № 2.
24. Кудрик Я. Я., Шинкаренко В. В. Імпульсний характеристикограф // Техніка і прилади СВЧ.— 2009.— № 2.— С. 60—61.
25. Кудрик Я. Я. Вимірювання ВАХ імпульсних кремнієвих ЛПД на участі лавинного пробоя // Технологія і конструювання в електронній апаратурі.— 2009.— № 5.— С. 32—33.
26. Патент 40035 України. Пристрій для отримання плазмових згустків // ДП НДІ «Гелій» / В. В. Севаст'янов, М. М. Когут.— 2009.— Бюл. № 6.
27. Дудин С. В., Рафальський Д. В. Закономерності формування пучка іонів низької енергії при допомозі односеточної іонно-оптичної системи // Технологія і конструювання в електронній апаратурі.— 2009.— № 6.— С. 42—45.
28. Рісін В. С., Ткаченко В. О., Сапон С. В. Чотириканальний мікропотужний операційний підсилювач з польовими транзисторами на вході // CHIP NEWS Україна.— 2008.— № 6.— С. 72—82.
29. Свідчення про державну реєстрацію топографії інтегральної мікросхеми / В. О. Ткаченко, В. С. Рісін, В. І. Захаренко, С. В. Сапон.— 2008.— Бюл. № 10.
30. Заявка № а2008 13628 від 25.11.2008 р. на видачу патенту України. Мікроелектронний координатно-чутливий детектор маспектрометра // ДП «НДІ мікроприладів» НТК «Інститут монокристалів» НАН України / О. І. Борискін, В. Г. Вербицький, О. М. Забродіна та ін.
31. Сидоренко В. П., Вербицький В. Г., Прокоф'єв Ю. В. і др. СБИС для мікроелектронного координатно-чутливого детектора приборів елементного аналізу матеріалів // Технологія і конструювання в електронній апаратурі.— 2009.— № 2.— С. 25—29.
32. Патент 43851 України. Напівпровідниковий р-і-п надвисокочастотний діод // ДП НДІ «Оріон» / В. В. Басанець, М. С. Болтовець, Г. М. Веремійченко та ін.— 2009.— Бюл. № 17.
33. Болтовець Н. С., Борисенко А. Г., Іванов В. Н. і др. Формування меза-структур 4HSiC р-і-п-діодів методом іонно-плазменного травлення // Технологія і конструювання в електронній апаратурі.— 2009.— № 5.— С. 45—48.
34. Заявка № а2009 04954 від 19.05.2009 р. на видачу патенту України. Омична контактна система для напівпровідникових приладів з карбідом кремнію // ДП НДІ «Оріон» / В. В. Басанець, М. С. Болтовець, Г. М. Веремійченко та ін.
35. Belyaev A. E., Boltovets N. S., Ivanov V. N. et al. Heat-resistant barrier and ohmic contacts based on TiB_x and ZrB_x interstitial phases to microwave diode structures // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics.— 2008.— Vol. 11, N 3.— P. 209—216.
36. Заявка № u2009 10362 від 13.10.2009 р. на видачу патенту України. Діод Ганна з фосфіду індію // ДП НДІ «Оріон» / О. Є. Беляєв, Р. В. Конакова, Я. Я. Кудрик та ін.
37. Іванов В. Н., Ковтонюк В. М., Раєвська Н. С., Ніколаєнко Ю. Е. Особливості технології і конструювання InP-діодів Ганна // Техніка і прилади СВЧ.— 2009.— № 1.— С. 31—33.
38. Заявка № u 2009 12890 від 11.12.2009 р. на видачу патенту України. Лавинно-пролітний діод з термостійкою контактною системою // ДП НДІ «Оріон» / М. С. Болтовець, Г. М. Веремійченко, Т. В. Коростинська та ін.
39. Заявка № а2009 13089 від 16.12.2009 р. на видачу патенту України. Високочастотна КМОН інтегральна схема для генераторів з кварцевою стабілізацією частоти // ДП «НДІ мікроприладів» НТК «Інститут монокристалів» НАН України / В. Г. Вербицький, Т. М. Віроzub, О. Ф. Вошкін та ін.

К. т. н. М. М. ВАКИВ, д. т. н. С. И. КРУКОВСКИЙ,
д. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО, Р. С. КРУКОВСКИЙ,
В. Р. ТИМЧИШИН, Н. Я. СЫВОРОТКА

Украина, г. Львов, НПП «Карат»;
г. Киев, Минпромполитики Украины
E-mail: carat207@i.ua

Дата поступления в редакцию
22.12.2009 г.

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

МОДУЛЬ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЙ A_3B_5 С КОНЦЕНТРАТОРАМИ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ И СИСТЕМОЙ ТЕПЛООТВОДА

Разработана новая конструкция и технология изготовления модуля солнечных батарей с КПД 27–28% на основе эпитаксиальных структур $GaAs(AlGaAs)/InGaP$ с концентраторами солнечной энергии и теплоотводом.

Солнечная фотоэнергетика является одной из наиболее быстроразвивающихся отраслей мировой экономики. Среднегодовой прирост объема производства энергии в этой отрасли в 2005–2010 гг. оценивается в 30%. Сдерживающим фактором быстрого развития фотоэнергосистем является их высокая стоимость. Перспективным путем снижения стоимости солнечной электроэнергии является использование фотоэнергосистем с концентраторами солнечного излучения.

Стоимость электроэнергии, производимой концентраторными фотоэлектрическими системами, может быть уменьшена более чем в 2 раза благодаря снижению площади солнечных элементов в 500–1000 раз. При этом удельная вырабатываемая энергия в таких солнечных батареях может быть увеличена в 3 раза за счет большего КПД и обеспечения точной ориентации на Солнце.

Применение солнечных элементов с концентраторами излучения позволяет резко снизить их стоимость за счет уменьшения площади используемых дорогих полупроводниковых материалов, а уровень развития технологии изготовления таких элементов дает возможность использовать ее для целей солнечной энергетики в широком масштабе. Причем эта сложная и, в общем, дорогая технология принципиально открывает возможность получения самой дешевой электроэнергии из всех известных методов преобразования солнечной энергии.

В настоящей работе ставилась задача разработать промышленнопригодную недорогую технологию изготовления фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии и создать на их основе конструкцию модуля солнечных батарей.

Для выбора технологического варианта получения сложных двухпереходных фотоэлектрических преобразователей были рассмотрены разные относительно дешевые способы. Одним из таких способов является низкотемпературная жидкофазная эпитаксия соединений A_3B_5 . Хотя этот метод и имеет ограниченные возможности при получении наноразмерных

структур, но он вполне может быть пригоден для получения субмикронных слоев с разным уровнем легирования.

При разработке технологии получения высококачественных эпитаксиальных структур с двумя и больше $p-n$ -переходами, способными работать при концентрированных потоках солнечной энергии, возникает много проблем. В частности, известно, что параметры большинства полупроводниковых приборов зависят от дефектности гетероперехода, уровня легирования слоев (в том числе неконтролируемыми примесями), диффузионной длины неосновных носителей. Концентрация фоновых примесей в активных слоях фотогенерирующих структур не должна превышать $2 \cdot 10^{15} - 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а диффузионная длина носителей должна достигать максимальных значений, которые можно получить в данных технологических условиях. Потому на первом этапе отработки технологического процесса изготовления любой гетероструктуры, в том числе и для фотоэлектрического преобразователя, необходимо решить задачу уменьшения концентрации неконтролируемых примесей в активных слоях.

Для использования в составе концентраторных солнечных батарей был выбран фотоэлектрический преобразователь на основе гетероструктуры с двумя рабочими $p-n$ -переходами на основе $GaAs(AlGaAs)/InGaP$.

Воспроизводимость параметров эпитаксиальных слоев в каждой серии технологических экспериментов зависит от концентрации фоновых доноров и акцепторов, которые попадают в расплав из основных источников загрязнений. Существует несколько способов, которые позволяют уменьшить фоновый уровень легирования, однако наиболее эффективным оказалось применение редкоземельных элементов (РЗЭ) и алюминия в жидкофазной эпитаксии материалов A_3B_5 [1–6].

Добавление РЗЭ в расплав способствует уменьшению концентрации электронов в слоях вплоть до инверсии типа проводимости из электронного в дырочный при определенных критических концентрациях. Критическое значение атомной доли редкоземельных элементов в A_3B_5 -материалах может изменяться от $5 \cdot 10^{-3}$ до $10^{-2}\%$. Авторами в предыдущих работах [7, 8] были проведены исследования влияния комплексного легирования разными редкоземельными и изовалентными элементами на электрофизические

свойства слоев GaAs, InGaAs и определены оптимальные соотношения этих элементов, при которых обеспечивается воспроизводимое получение планарных бездефектных слоев.

Для отработки технологии наращивания слоев InGaP, которые образуют верхнюю фотоэлектрическую ячейку фотопреобразователя, был использован тот же подход — комплексное легирование расплавов редкоземельными и изовалентными элементами.

Проанализируем подробнее этот способ на примере воспроизводимого получения n -слоев $\text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{P}$, которые используются в составе tandem-ных гетероструктур для фотопреобразователей.

Особенности технологии изготовления фотопреобразователей

Зависимость концентрации основных носителей N_n в слоях $\text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{P}$, легированных иттербием, и в слоях, комплексно легированных алюминием и иттербием, от количества иттербия в жидкой фазе X_{Yb}^L , приведена на рис. 1.

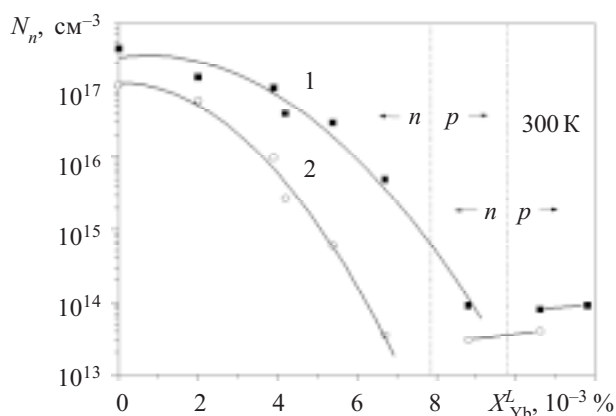


Рис. 1. Зависимость концентрации носителей заряда в эпитаксиальных слоях $\text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{P}$ от атомной доли Yb в расплаве индия:

1 — слой, легированный Yb; 2 — слой, комплексно легированный Yb и Al при атомной доле алюминия $N_{\text{Al}}^L = 1 \cdot 10^{-3} \%$

Как видно из рисунка, введение в расплав иттербия сопровождается уменьшением концентрации носителей. При значении атомной доли иттербия в расплаве $9,8 \cdot 10^{-3} \%$ происходит инверсия проводимости с n -типа на p . Однако при получении слоев n -типа существуют проблемы, предопределенные тем, что точка инверсии зависит от исходной концентрации неконтролируемых примесей в расплаве. Концентрация же этих примесей в каждой серии экспериментов может быть разной, а следовательно, и концентрация носителей заряда будет иметь значительный разброс, по крайней мере в слоях, полученных в разных сериях экспериментов. Во избежание этого необходимо предварительно ввести в расплав донорную примесь в количестве, которое стабилизирует уровень концентрации фоновых примесей на минимально возможном уровне, мало зависящем от концентрации РЗЭ в расплаве. Этого можно достичь, если ввести в расплав столько редкоземельного элемента, чтобы полученные слои имели p -тип проводимости. Поскольку для p -слоев зависимость концентрации дырок от концентрации РЗЭ в расплаве является мо-

нотонной, этим приемом добиваются желаемой стабилизации концентрации носителей заряда. Однако может оказаться, что при таких концентрациях РЗЭ морфология эпитаксиальных слоев ухудшится настолько, что они станут непригодными для фотолитографических процессов. Выход из этой ситуации обеспечивается использованием комплексного легирования расплавов РЗЭ и алюминием.

Добавление в расплав алюминия с атомной долей $1 \cdot 10^{-3} \%$ не изменяет характера поведения концентрации основных носителей, но существенно смещает точку инверсии в сторону меньших концентраций иттербия в расплаве раствора. Алюминий в таких количествах не изменяет ширину запрещенной зоны $\text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{P}$. Слои p -типа, как видно из рис. 1, можно получить при значительно меньших концентрациях иттербия в расплаве. Потому влияние РЗЭ на морфологию слоев уменьшается, а захвата микровключений РЗЭ эпитаксиальным слоем, который кристаллизуется, не происходит. Поскольку при добавлении алюминия в расплав инверсия типа проводимости происходит при значительно меньших концентрациях РЗЭ, морфология поверхности слоя не ухудшится.

Для наращивания контактного слоя $\text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{P}$ p -типа проводимости использовался магний. Зависимость концентрации дырок N_p в слоях $\text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{P}$, полученных из галлиевых расплавов и легированных одновременно иттербием и магнием, от количества магния в жидкой фазе X_{Mg}^L приведена на рис. 2.

Описанные экспериментальные результаты по легированию слоев были использованы при наращивании tandemной гетероструктуры GaAs(AlGaAs)/InGaP. Процесс наращивания был разбит на два этапа. На первом этапе методом низкотемпературной жидкофазной эпитаксии в интервале температур $650\text{—}550^\circ\text{C}$ на подложке n -GaAs наращивался первый рабочий p - n -переход $n\text{GaAs-}p\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0,1$) и туннельный диод $n\text{GaAs-}p\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0,2\text{—}0,3$) с концентрацией основных носителей $(3\text{—}5) \cdot 10^{17}$ и $(1\text{—}2) \cdot 10^{19} \text{см}^{-3}$, соответственно. На втором этапе в интервале температур $750\text{—}680^\circ\text{C}$ проводилось наращивание широкозонного p - n -перехода, образованного слоями $n\text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{P}$ и $p\text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{P}$ с концентрацией основных

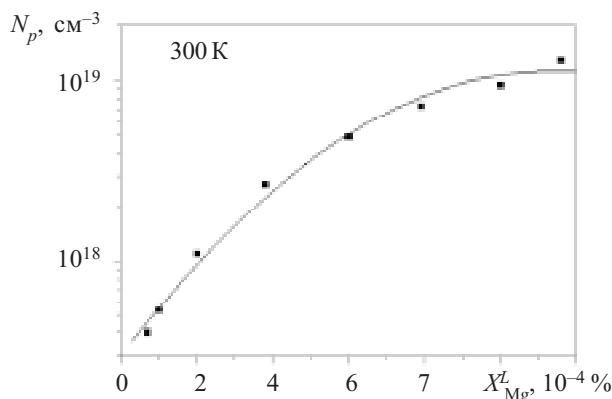


Рис. 2. Зависимость концентрации дырок в эпитаксиальных слоях $\text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{P}$ от атомной доли Mg в растворе-расплаве галлия при фиксированных оптимальных концентрациях $N_{\text{Yb}}^L = 9 \cdot 10^{-3} \%$ и $N_{\text{Al}}^L = 1 \cdot 10^{-3} \%$

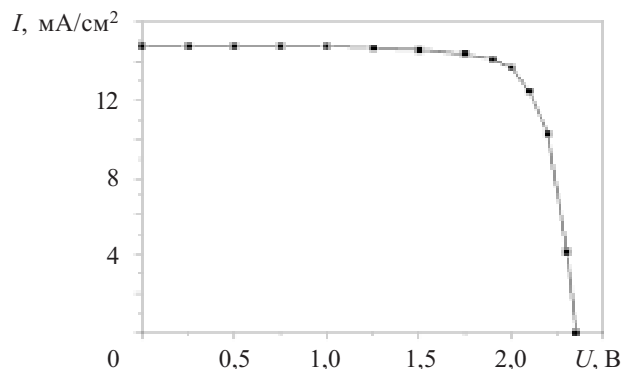


Рис. 3. Типичная вольт-амперная характеристика фотоэлектрического преобразователя на основе тандемной гетероструктуры GaAs(AlGaAs)/InGaP при спектральных условиях AM 1,5

носителей $(2-4) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, а также контактного слоя $p^+ \text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{P}$. Контакты к фронтальной поверхности гетероструктуры изготавливались из сплава Au-Ge-Ni, а к тыльной — на основе сплава Au-Zn-Ni.

Параметры фотоэлектрических преобразователей с активной площадью $0,98 \text{ см}^2$, изготовленных на основе вышеописанной структуры, исследовались при спектральных условиях AM1,5 и разных степенях концентрации солнечного света. Вольт-амперная характеристика фотоэлектрического преобразователя на основе тандемной гетероструктуры GaAs(AlGaAs)/InGaP, измеренная без концентрации солнечного излучения, приведена на **рис. 3**.

Конструкция модуля с теплоотводом

Для изготовления модуля были отобраны фотопреобразователи с КПД от 27 до 28%. При изготовлении модуля использовалось последовательно-параллельное соединение шести фотопреобразователей. Важнейшей задачей при конструировании модулей солнечных батарей с концентраторами солнечной энергии является отвод тепла от кристалла фотопреобразователя. Для этого авторами была использована тепловая труба из алюминиевого сплава АД 31, изготовленная в Лаборатории тепловых труб НТУУ «КПИ». В качестве теплоносителя использовали ацетон. Монтаж кристалла на тепловой трубе схематически показан на **рис. 4**.

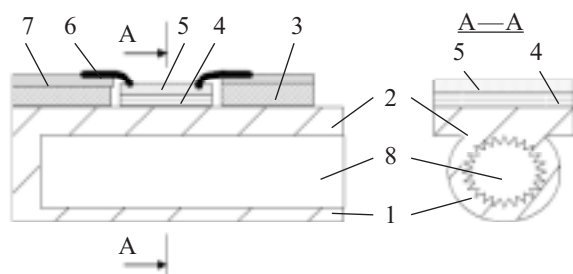


Рис. 4. Схема монтажа кристалла фотоэлектрического преобразователя на тепловой трубе:

1 — тепловая труба; 2 — несущее ребро тепловой трубы; 3 — стеклотекстолит; 4 — индиевая фольга; 5 — кристалл фотоэлектрического преобразователя; 6 — прижимной пружинный контакт; 7 — медная фольга; 8 — паровое пространство тепловой трубы

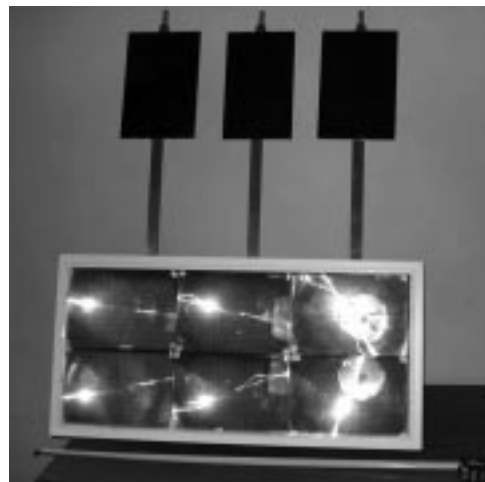


Рис. 5. Модуль солнечной батареи с концентратором на основе линз Френеля и теплоотводом на основе тепловых труб, снабженных радиаторными пластинами

Кристалл фотоэлектрического преобразователя с помощью прижимного пружинного контакта фиксировался на тепловой трубе. Для обеспечения надежного электрического и теплового контакта тыльной стороны кристалла с тепловой трубкой он был помещен на тонкую ($100-150 \text{ мкм}$) индиевую фольгу, к свободному концу которой механически прикреплялся электрический проводник. Электрический контакт к фронтальной поверхности кристалла фотоэлектрического преобразователя обеспечивался несколькими золотыми проводниками.

Конструкция модуля солнечной батареи с концентратором и теплоотводом на основе тепловых труб показана на **рис. 5**. В качестве концентратора солнечного света использовано шесть линз Френеля размером $260 \times 180 \text{ мм}$ с фокусным расстоянием 180 мм . На электроизолированном днище корпуса модуля закреплены три тепловые трубы длиной по 1000 мм . На каждой тепловой трубе в фокусах линз с обеспечением теплового контакта (см. **рис. 4**) было размещено по два фотоэлектрических преобразователя. Тепловая труба эффективно отводила тепло от фотопреобразователя к радиатору. Радиатор выполнен в виде пластины размером $200 \times 300 \text{ мм}$ из алюминиевого сплава, окрашен в черный цвет и прикреплен к тепловой трубе с помощью винтов. Контактные поверхности тепловой трубы и радиатора смазаны теплопроводной пастой КПТ-8. Электрическая коммутация кристаллов преобразователя осуществляется медными проводниками. Конструкция модуля обеспечивает возможность установки его под необходимым углом наклона к горизонту.

Для отработки оптимальных тепловых режимов модуля солнечной батареи с концентратором были проведены исследования динамических режимов работы тепловой трубы в условиях воздействия концентрированного солнечного света на фотопреобразователи. Измерения проводились с помощью термоэлектрических преобразователей ТХА, которые закреплялись на обратной стороне несущего ребра тепловой трубы согласно **рис. 6** (номера точек измерения обведены квадратами).

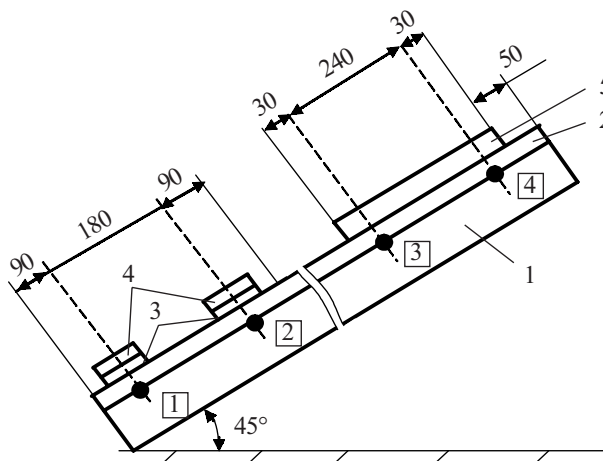


Рис. 6. Схема расположения точек измерения температуры на тепловой трубе:

1 — тепловая труба; 2 — несущее ребро тепловой трубы; 3 — индеевая прокладка; 4 — фотоэлектрический преобразователь на основе гетероструктуры GaAs(AlGaAs)/InGaP; 5 — радиаторная пластина

Световой поток, сфокусированный каждой линзой Френеля, падал на соответствующий фотоэлектрический преобразователь. Максимальная плотность мощности солнечного излучения при спектральных условиях AM1,5 составляет около 50 Вт/см². При КПД фотопреобразователя 27—28% тепловая мощность, отводимая тепловой трубой от двух установленных на ней фотопреобразователей, составляет 73—72 Вт. Результаты измерений температурного профиля по тепловой трубе в динамическом режиме без радиатора и с радиатором приведены на рис. 7.

Как видно из рисунка, система теплоотвода на основе тепловой трубы обеспечивает высокую равномерность температуры в местах установки фотопреобразователей: разность температуры в точках 1 и 2 не превышала 2°C. Максимальное значение температуры в зоне размещения фотопреобразователей на тепловой трубе без радиатора составило 102°C, в то время как допустимое из соображений надежности значение температуры в точках 1 и 2 составляет 120°C.

Установка радиатора в зоне конденсации тепловой трубы значительно снижает температуру в месте размещения фотопреобразователей. В установившемся тепловом режиме (при $\tau=300$ с) значение температуры в зоне установки фотопреобразователей снизилось со 101 до 82 и со 102,4 до 82,2°C соответственно в точках 1 и 2. Термическое сопротивление тепловой трубы при этом составило 0,27 °C/Вт. Достигнутое снижение температуры фотопреобразователей на 19—20°C за счет использования радиатора обеспечивает повышение надежности работы фотопреобразователей и возможность эксплуатации солнечной батареи в жарких районах.

Натурные испытания опытного образца модуля проводились в естественных условиях в летнее время при световом потоке около 55000 лк, что соответствовало спектральным условиям AM1,5. Результаты испытаний показали, что коэффициент полезного действия модуля при 500-кратной концентрации солнечного света достигает 27,8%, а генерируемая элек-

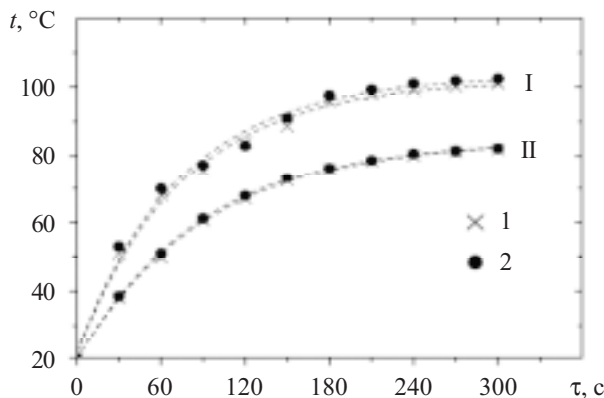


Рис. 7. Изменение во времени τ температуры t на тепловой трубе без радиатора (I) и с радиатором (II) в зоне размещения фотопреобразователей (точки 1 и 2 на рис. 6)

трическая мощность — 78 Вт при активной площади модуля 0,98 см².

Таким образом, использование в качестве теплоотвода алюминиевой трубы, заполненной ацетоном, с радиаторной пластиной обеспечивает нормальный тепловой режим и надежную работу фотопреобразователей в модулях солнечных батарей с концентраторами солнечной энергии.

Выводы

Разработана новая промышленнопригодная технология изготовления фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии на основе эпитаксиальных структур GaAs(AlGaAs)/InGaP с двумя рабочими p - n -переходами и создана конструкция модуля солнечных батарей с КПД 27—28% с концентраторами солнечной энергии в виде линз Френеля и теплоотводом на основе тепловой трубы, снабженной радиаторной пластиной.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Мастеров В. Ф., Захаренков Л. Ф. Редкоземельные элементы в полупроводниках A^3B^5 // ФТП.— 1990.— Т. 21, вып. 4.— С. 610—630.
2. Гореленок А. Т., Каманин А. В., Шмидт Н. М. Редкоземельные элементы в технологии соединений A^3B^5 и приборов на их основе // ФТП.— 2003.— Т. 37, вып. 8.— С. 922—940.
3. Prochazkova O., Zavadil J., Zdansky K. Effect of holmium addition during LPE growth on the properties of InP and GaInAsP layers // Czechoslovak Journal of Physics.— 1997.— Vol. 47, N 7.— P. 685—691.
4. Ларионов В. Р., Минтаиров А. М., Смекалин К. Е., Хвостиков В. В. Кристаллизация и легирование квантово-размерных слоев AlGaAs // Тез. докл. V Всесоюз. Конф. по физическим процессам в полупроводниковых гетероструктурах.— Россия, г. Калуга.— 1990.— С. 11—12.
5. Milanova M., Khvostikov V. Growth and doping of GaAs and AlGaAs layers by low-temperature liquid-phase epitaxy // Journal of Crystal Growth.— 2000.— Vol. 219.— P. 193—198.
6. Акчурун Р. Х., Донская И. О., Дулин С. И., Уфимцев В. Б. Расчет изменения концентрации собственных дефектов в арсенидах галлия и индия при изовалентном легировании висмутом // Кристаллография.— 1988.— Т. 33, вып. 2.— С. 464—470.
7. Николаенко Ю. Е., Круковский С. И., Завербный И. Р. и др. Получение тандемных гетероструктур GaAs-InGaAs-AlGaAs для фотопреобразователей солнечной энергии // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2002.— № 3.— С. 27—29.
8. Круковский С. И., Николаенко Ю. Е. Модули солнечных элементов на основе тандемных гетероструктур GaAs-InGaAs-AlGaAs // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2004.— № 6.— С. 23—26.

К. т. н. Г. С. ПЕТРОСЯН, к. т. н. О. Б. ПОЛУБАСОВ

Россия, г. Санкт-Петербург, ООО «Эремекс»
E-mail: serge_luzin@yahoo.com

Дата поступления в редакцию
19.11 2009 г.

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

ВЫБОР ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНЫХ СЛОЕВ ДЛЯ ПРОВОДНИКОВ ПРИ ТРАССИРОВКЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Описана методика выбора предпочтительных слоев для проводников при трассировке многослойных печатных плат, применяемая в САПР ТороR с целью повышения качества и быстродействия разводки.

В отечественной САПР ПП ТороR [1, 2] при трассировке в качестве модели используется совмещенная топология проводников, которая характеризуется тем, что в каждой точке пересекаются не более двух проводников. Эффективный алгоритм расслоения [3] для двухслойной платы точно минимизирует количество межслойных переходов за пропорциональное числу пересечений время.

Для многослойной платы задача расслоения становится NP -трудной, поэтому на отыскание полиномиального алгоритма ее точного решения рассчитывать не приходится. ТороR использует эвристический алгоритм, находящий приближенное решение задачи. Существуют некоторые простые приемы, позволяющие увеличить точность и быстродействие эвристического алгоритма. Например, в большинстве САПР есть возможность вручную задать для слоя преимущественное направление трассировки. Такое задание, несомненно, может уменьшить количество «конфликтов» между проводниками и ускорить трассировку, однако в некоторых случаях этот прием может даже ухудшить разводку. Во-первых, на выбор слоя влияет не общее направление проводника (между конечными точками), а направление каждого отдельного его отрезка, что может ощутимо увеличить количество межслойных переходов. Во-вторых, пользователь не всегда обладает необходимой информацией (а иногда и квалификацией) для оптимального назначения преимущественных направлений трассировки в слоях.

Рассмотрим способ решения поставленной задачи, но прежде введем используемые в статье определения.

Угол наклона отрезка, соединяющего начальную и конечную точки проводника (точнее, направление отрезка), будем ставить в соответствие некоторому бисектору круга, в который попадает это направление. Под бисектором здесь понимается фигура, образованная двумя секторами круга, симметричными

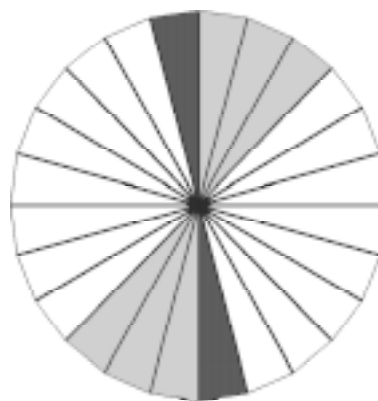


Рис. 1. Кластер, состоящий из четырех бисекторов (головной бисектор — более темный)

относительно его центра. Цепочку из некоторого числа смежных бисекторов будем называть кластером (см. рис. 1).

Суммарную длину проводников, направления которых попадают в бисектор, назовем мощностью бисектора, количество бисекторов в кластере — размером кластера, а сумму мощностей бисекторов в кластере — мощностью кластера.

Крайний против часовой стрелки бисектор будем называть головным бисектором кластера, остальные — хвостовыми. Ведущий кластер — это кластер с мощностью, не меньше требуемой, и при этом минимального размера. Плотность проводников (отношение мощности к размеру) в этом кластере максимальна. Левым крылом будем называть кластеры, соседствующие с ведущим по направлению против часовой стрелки, правым — по часовой.

Объединение направлений в кластеры

Если число внутренних слоев $N > 1$, то можно было бы просто разделить круг на N одинаковых частей (бисекторов). Однако поскольку направления проводников распределены неравномерно (например, в кросс-плате все проводники почти параллельны), то и размеры частей имеет смысл сделать неодинаковыми.

Поставим целью разбить круг на N кластеров, соответствующих числу внутренних слоев, примерно одинаковой мощности, т. е. с примерно одинаковой суммарной длиной проводников. Для этого применим следующий алгоритм.

1. Разбить круг на какое-то количество (например, 180) одинаковых бисекторов.
2. Вычислить мощность каждого бисектора и суммарную мощность всех бисекторов.
3. Разделив суммарную мощность на N , получить требуемую мощность P одного кластера.
4. Выбрать ведущий кластер. Для этого:
 - Создать кластер, состоящий из одного бисектора с номером 0.
 - Дополнять кластер хвостовыми бисекторами по часовой стрелке до достижения кластером требуемой мощности.
 - Запомнить кластер и его плотность как рекордные.
 - Для бисекторов от 1 до последнего
 - {
 - Добавить в кластер новый головной бисектор против часовой стрелки.
 - Пока разность текущей мощности кластера и мощности последнего из хвостовых бисекторов остается не меньше требуемой мощности кластера,
 - Удалить из кластера последний из хвостовых бисекторов.
 - Если плотность увеличилась,
 - Запомнить новый рекорд.
 - }
- В результате за пропорциональное числу бисекторов время будут проверены все возможные кластеры требуемой мощности и найден ведущий.
5. Текущую мощность положить равной мощности ведущего кластера.
6. Построить остальные кластеры.
 - Для i от 2 до $N-1$
 - {
 - Создать новый кластер.
 - Если мощность левого крыла меньше мощности правого
 - {
 - Повторять
 - {
 - Добавить следующий против часовой стрелки бисектор в новый кластер.
 - Увеличить текущую мощность и мощность левого крыла на мощность бисектора.
 - }
 - Пока текущая мощность меньше iP .
 - }
 - Иначе
 - {
 - Повторять
 - {
 - Добавить следующий по часовой стрелке бисектор в новый кластер.
 - Увеличить текущую мощность и мощность правого крыла на мощность бисектора.
 - }
 - Пока текущая мощность меньше iP .
 - }
 - }
 - }
7. Оставшиеся бисекторы включить в последний кластер.

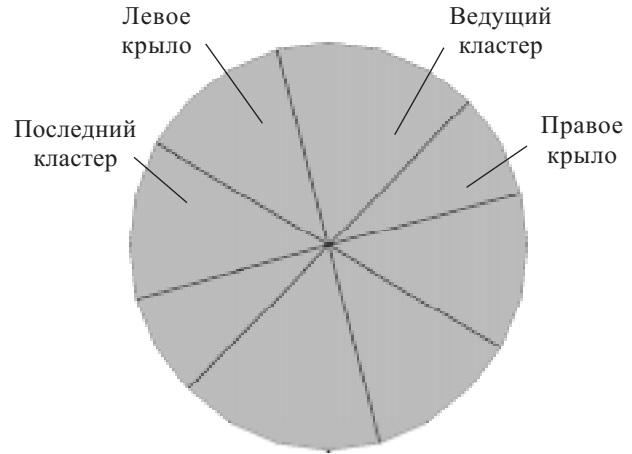


Рис. 2. Разбиение круга на четыре кластера

Примечание. Крылья наращиваются равномерно, для того чтобы избежать проблем в некоторых «экзотических» случаях, например, когда направления всех проводников попадают в один бисектор.

На рис. 2 показано возможное разбиение круга на кластеры.

Назначение кластеров на слои с целью минимизации наводок

Для уменьшения взаимных наводок целесообразно соседним слоям назначать кластеры, имеющие как можно более разные направления.

Пусть ведущий кластер имеет номер 0, а нумерация остальных кластеров — по порядку против часовой стрелки от него. Тогда для разного числа внутренних слоев назначение кластеров, минимизирующее наводки, можно производить исходя из принципа

$$v[i] = i(N+1)/2 \bmod N,$$

где $i=0, 1, \dots, N-1$; $v[i]$ — номер кластера, назначенного на i -й слой; деление — целочисленное, с отбрасыванием дробной части. В этом случае назначение может быть таким:

- 2: 0, 1.
- 3: 0, 2, 1.
- 4: 0, 2, 1, 3.
- 5: 0, 3, 1, 4, 2.
- 6: 0, 3, 1, 4, 2, 5.
- 7: 0, 4, 1, 5, 2, 6, 3.
- 8: 0, 4, 1, 5, 2, 6, 3, 7.
- и т. д.

С помощью формулы $v[i] = (N^2 - i(N+1)/2) \bmod N$ можно получить другое назначение, также минимизирующее наводки:

- 2: 0, 1.
- 3: 0, 1, 2.
- 4: 0, 2, 3, 1.
- 5: 0, 2, 4, 1, 3.
- 6: 0, 3, 5, 2, 4, 1.
- 7: 0, 3, 6, 2, 5, 1, 4.
- 8: 0, 4, 7, 3, 6, 2, 5, 1.
- и т. д.

Все остальные назначения, минимизирующие наводки, получаются из этих двух путем циклического сдвига нумерации кластеров на величину от 0 до $N-1$. Таким образом, таких назначений может быть всего $2N$, и все они описываются формулами

$$v[i] = (i(N+1)/2 + S) \bmod N;$$

$$v[i] = (N^2 - i(N+1)/2 + S) \bmod N,$$

где $S=0, 1, \dots, N-1$; $i=0, 1, \dots, N-1$.

Назначение кластеров на слои с учетом пользовательских предпочтений

Для некоторых цепей пользователем могут быть заданы предпочтительные слои. Логично, чтобы как можно больше направлений проводников этих цепей попадали в кластеры, назначенные соответствующим слоям. Для того чтобы качественно оценить назначения кластеров на слои недостаточно определить, попадает направление проводника в кластер или нет. Необходимо знать насколько хорошо попадает или насколько далеко не попадает направление проводника в кластер. Определим критерий для такой оценки.

Назовем директором вектор, лежащий на оси симметрии кластера. Длину директора примем обратно пропорциональной косинусу половины угла раствора кластера.

Ковариацией директора и вектора направления проводника (его длина — произвольная константа) здесь является модуль их скалярного произведения (модуль, потому что начало и конец проводника равноправны). При указанном выборе директоров направление проводника всегда попадает именно в тот кластер, с директором которого у него наибольшая ковариация (рис. 3). Таким образом, определенная выше ковариация является подходящим критерием оценки близости направления проводника к кластеру.

Заметим, что нельзя вычислить какое-то «среднее» направление проводников на слое, «среднее» направление не определено, т. к. у проводников нет ориентации, и просуммировать направления проводников можно 2^{n-1} способами. Зато можно однозначно вычислить суммарную ковариацию направлений проводников в слое с директором кластера, назначенного этому слою. Так как для цепи пользователем может быть задано несколько, пусть k , предпочтительных слоев, то ковариация каждого проводника этой цепи с соответствующим директором должна входить в суммарную ковариацию с весом $1/k$. Конечно, хотя бы один слой проводнику должен быть разрешен всегда.

Если для каждого слоя вычислить суммарную ковариацию направлений проводников с каждым директором, то получится матрица цен назначения кластеров на слои. Для решения задачи о назначениях [4, с. 400] существуют полиномиальные, но довольно трудоемкие алгоритмы. С другой стороны, нет смысла точно решать задачу с неточным,

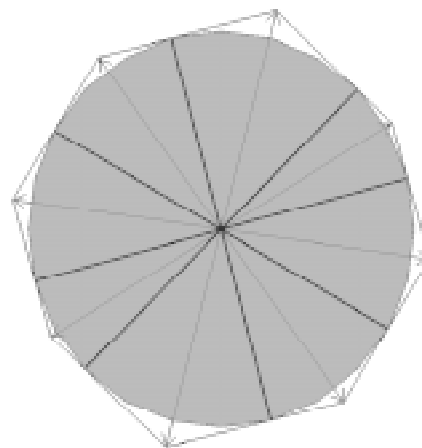


Рис. 3. Директоры

статистическим критерием. Поэтому проверим только $2N$ назначений, минимизирующих наводки, и выберем назначение, максимизирующее суммарную ковариацию.

Назначение проводникам предпочтительных слоев

Так как на внешних слоях современных многослойных печатных плат значительную площадь обычно занимают SMD-компоненты (в том числе BGA), для проводников остается мало места, поэтому для проводников назначать предпочтительными внешние слои нецелесообразно. Назначение слоя для каждого проводника производится следующим образом.

1. Определить цепь.
2. Если для цепи задано множество предпочтительных слоев, назначить проводнику заданное множество слоев.
3. В противном случае найти кластер, в который попадает общее направление проводника, и назначить проводнику слой, на который назначен найденный кластер.

Описанная методика выбора предпочтительных слоев для проводников при трассировке многослойных печатных плат используется в САПР ТороR.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Лузин С. Ю., Лячек Ю. Т., Полубасов О. Б. Автоматизация проектирования печатных плат. Система топологической трассировки ТороR.— СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005.
2. Полубасов О. Б., Дмитриев П. И., Зудин С. В. и др. Система топологической трассировки печатного монтажа «ТороR» // Свид. об официальной регистрации программы для ЭВМ №2005611370.— М.: РОСПАТЕНТ, 2005.
3. Полубасов О. Б. Глобальная минимизация количества межслойных переходов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2001.— № 2.— С. 3—9.
4. Свами М., Тхуласираман К. Графы, сети, алгоритмы.— М.: Мир, 1984.

К. ф.-м. н. В. Л. ПЕРЕВЕРТАЙЛО, к. т. н. Ю. Г. ДОБРОВОЛЬСКИЙ,
к. ф.-м. н. В. М. ПОПОВ, А. П. ПОКАНЕВИЧ, В. М. МАЦКЕВИЧ,
д. ф.-м. н. В. Д. РЫЖИКОВ, Б. Г. ШАБАШКЕВИЧ, В. Г. ЮРЬЕВ

Украина, г. Киев, НИИ микроприборов;
г. Черновцы, НПФ «Тензор»;
г. Харьков, Институт сцинтилляционных материалов
E-mail: td_tenzor@mail.ru

Дата поступления в редакцию
25.01.2010 г.

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

ФОТОДИОД УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ СЕЛЕНИДА ЦИНКА

Исследования электрофизических и фотоэлектрических характеристик разработанных фотодиодов Шоттки на основе Ni-ZnSe(Te, O)-In показали, что они могут быть применены в приборах для радиометрии и дозиметрии УФ-излучения.

Широкое использование разнообразных источников ультрафиолетового (УФ) излучения как в промышленности, так и в бытовой сфере, в сфере услуг, медицине, ставит задачу корректного измерения параметров этого излучения. Необходимость и актуальность проведения таких измерений очевидна — УФ-излучение различного спектрального состава влияет на биологические процессы, протекающие в организме человека. Именно эта область спектра оптического излучения (200—400 нм) предопределяет разные фотохимические реакции и разрыв химических связей для многих химических веществ [1, с. 19—30].

Различают три диапазона УФ-излучения: «А» с длиной волны от 315 до 400 нм, «В» — от 280 до 315 нм, «С» — от 200 до 280 нм [2, 3].

Одним из основных параметров, подлежащих контролю, является энергетическая освещенность или интенсивность УФ-излучения. Обычно для измерения этого параметра используются УФ-радиометры. В качестве датчиков в них используются различные приемники УФ-излучения — вакуумные фотоэлементы, электронные фотоумножители, фотодиоды. Первые два класса фотоприемников обладают высокой чувствительностью, что обуславливает их эффективность при измерении излучения, генерированного отдельными квантами. Однако они требуют высокого напряжения, а нелинейность их энергетической характеристики находится в пределах от 4 до 10%. Фотодиоды, в отличие от первых двух классов фотоприемников, обладают меньшей чувствительностью, но могут работать без электрического напряжения (смещения), а нелинейность энергетической характеристики у них может быть доведена до 1% и менее.

Существуют фотодиоды УФ-диапазона на основе различных материалов — кремния [4], фосфида

галлия [5, 6], карбида кремния [7], нитрида галлия [8] и др.

Недостатком кремниевых фотодиодов является наличие чувствительности за пределами УФ-диапазона — в видимой и инфракрасной областях спектра. Фотодиоды на основе фосфида галлия имеют малую чувствительность в области 200—250 нм. Фотодиоды на основе карбида кремния достаточно чувствительны к излучению с длиной волны около 300 нм, однако их чувствительность в диапазоне 200—250 и 350—400 нм невелика. Фотодиоды на основе нитрида галлия имеют хорошие параметры, но сам материал достаточно дорогой, что ограничивает его широкое использование в продукции общего применения.

В последние годы проводятся интенсивные исследования диодов Шоттки на основе ZnSe [9—11] с целью создания энергоселективных УФ-фотодиодов, нечувствительных к оптическому излучению видимого и ближнего инфракрасного диапазонов. Такой интерес продиктован широким диапазоном чувствительности селенида цинка в УФ-области спектра, что в сочетании с фильтрами позволяет создавать энергоселективные УФ-фотоприемники, а также тем, что в настоящее время селенид цинка производится Институтом сцинтилляционных материалов [11], т. е. стал доступен для изготовления УФ-фотодиодов.

Целью настоящей работы является разработка фотодиодов с барьером Шоттки на основе селенида цинка и исследование их электрофизических и фотоэлектрических характеристик.

Направления и результаты предварительных исследований

Свойства ZnSe как полупроводникового материала и диодов Шоттки на его основе, в том числе УФ-фотодиодов, были изучены недостаточно полно для их успешной технологической реализации. Поэтому перед изготовлением экспериментальных образцов были проведены исследования следующих характеристик исходного материала ZnSe (Te, O) [12—16]:

- концентрация свободных носителей заряда и удельное поверхностное сопротивление;
- спектры пропускания ИК-излучения;
- состав неконтролируемых примесей и характер их распределения по поверхности кристаллов.

Концентрация свободных носителей заряда в приповерхностной области кристаллов ZnSe(Te), отражающая эффективную концентрацию легирующей

примеси, рассчитывалась по высокочастотным вольт-фарадным характеристикам. Для подложек, которые были изготовлены методом Бриджмена на предприятии ИСМА НАНУ [11, с. 344], значения концентрации лежат в диапазоне 10^{15} — 10^{17} см⁻³. Установлено, что профили распределения концентрации свободных носителей заряда по глубине полупроводника могут быть как с повышением, так и с понижением концентрации от границы раздела «металл—полупроводник». Выявлена также значительная неоднородность электрофизических характеристик кристалла ZnSe по площади, которая обусловлена его мультикристаллической структурой [12—14].

При разработке приборов учитывалось, что чувствительность фотоприемника за пределами измеряемых поддиапазонов спектра, недостаточная линейность энергетической характеристики в рабочем диапазоне энергетической освещенности и температурная нестабильность могут привести к искажению результатов измерений энергетической освещенности УФ-излучения.

Схематическое изображение предложенной конструкции УФ-фотодиода на основе селенида цинка [17] и его внешний вид приведены на рис. 1.

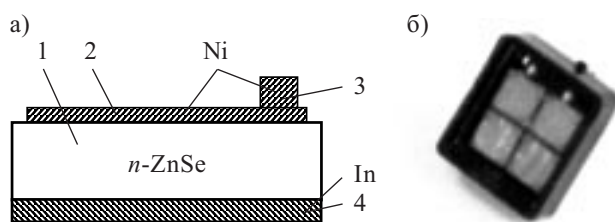


Рис. 1. Схематическое изображение (а) и внешний вид (б) УФ-фотодиода на основе ZnSe:

1 — кристалл ZnSe; 2 — полупрозрачный слой Ni; 3 — контактный слой Ni; 4 — омический контактный слой In

На кристалле ZnSe *n*-типа проводимости, легированном теллуром или кислородом, толщиной 1 мм (1) располагается полупрозрачный слой никеля (2) толщиной менее 10 нм, который создает барьер Шоттки и должен пропускать не менее 70% излучения с длиной волны 400 нм. На периферии кристалла сформирован более толстый, чем барьерный, контактный слой никеля (3) толщиной не менее 0,2 мкм (область контакта к барьеру Шоттки). Никелевый электрод отступает от торцов кристалла селенида цинка на расстояние, не меньше чем сумма диффузионной длины неосновных носителей заряда и толщины области пространственного заряда (в нашем случае оно составляло от 10 до 50 мкм). Минимальная величина этого расстояния определяется объемным сопротивлением материала базы, а максимальная продиктована технологическими и экономическими соображениями. Общий нижний омический контакт из индия (4) расположен на обратной стороне кристалла селенида цинка.

Технология изготовления фотодиодов Шоттки со структурой Ni–ZnSe(Te,O)–In

С учетом вышесказанного, нами предложена технология изготовления фотодиодов Шоттки со струк-

турой Ni–ZnSe(Te,O)–In [18], которая базируется на использовании технологических процессов изготовления кремниевых фотодиодов, в частности групповой обработки кристаллов с чипами УФ-сенсоров. Проведены исследования электрофизических и фотоэлектрических характеристик чипов на разных этапах изготовления.

Разработанная технология включает в себя следующие этапы и процессы:

- очистка и химобработка поверхности ZnSe;
- нанесение наноразмерных полупрозрачных металлических покрытий для формирования барьера Шоттки;
- создание омических контактов к обратной стороне ZnSe(Te)-подложки;
- создание контактов к полупрозрачной металлической пленке Ni;
- формирование микрорисунка чипов-диодов;
- термообработка для оптимизации параметров металлических пленок и перехода «металл—полупроводник»;
- нанесение пассивирующих покрытий (варианты фотодиодов с покрытиями и без покрытия представлены в [19, 20]);
- разделение кристалла ZnSe на отдельные чипы;
- сборка УФ-сенсоров в корпуса;
- проведение измерений параметров полученных структур.

На стадии подготовки поверхности ZnSe к операции нанесения пленки металла, которая образует барьер Шоттки, необходимо было исследовать влияние операций очистки поверхности ZnSe на электрофизические и фотоэлектрические параметры диода Шоттки. Наиболее перспективными способами очистки поверхности ZnSe является плазмохимическая очистка (травление) или термоионное травление, которое может предшествовать процессу термоионного напыления пленки металла для формирования диода Шоттки.

Операция нанесения наноразмерных полупрозрачных металлических покрытий для формирования диода Шоттки требует как контроля толщины пленки для обеспечения прозрачности металлического электрода, так и чистоты процесса и бездефектности структуры для обеспечения низких обратных токов через барьер Шоттки. Контроль толщины пленки, которая должна составлять 80—100 Å, осуществлялся после напыления металла на кристалл и на специальную стеклянную пластину-спутник. Толщина пленки определялась на профилометре по высоте перепада «стекло — металлическая пленка», который формируется с помощью металлической маски на пластине-спутнике. Точность измерения толщины пленки с помощью микропрофилометра колеблется в пределах 5—10 Å.

Создание омического контакта к обратной стороне кристалла ZnSe(Te) усложнено наличием оксидной пленки на поверхности материала, которая очень быстро формируется в присутствии кислорода в окружающей среде. Невзирая на высокий коэффициент диффузии металла, который используется для создания омического контакта (в нашем случае —

индия), оксидная пленка не дает возможности металлу продиффундировать с поверхности в объем материала. Поэтому ее необходимо удалить и не допускать контакта ZnSe с кислородом до нанесения пленки индия.

Омический контакт к полупрозрачной пленке никеля формируется напылением толстой пленки Ni через маску, что обеспечивает защиту поверхности полупроводника и барьерной пленки от возможных повреждений в области формирования контакта.

Формирование микрорисунок (топологии) чипов-фотодиодов может осуществляться либо напылением тонкой металлической пленки никеля через маску, либо напылением сплошной тонкой пленки никеля с последующей фотолитографией по ней и формированием металлических площадок фотодиодов.

Разделение кристалла ZnSe на отдельные чипы осуществляется на автомате дисковой резки пластин. Толщина режущего диска составляет 50—100 мкм.

На опытных образцах УФ-фотодиодов на подложку из селенида цинка была нанесена сверхтонкая никелевая пленка толщиной 8—10 нм, а в областях контактов — никелевая пленка толщиной около 0,2 мкм. На обратную сторону подложки наносился контакт из индия. Размеры кристаллов опытных образцов составляли 4×4 мм.

Электрофизические и фотоэлектрические характеристики диодов Шоттки Ni–ZnSe(Te)–In

Сформированные барьерные структуры Ni–ZnSe(Te)–In имели типичные диодные характеристики и фоточувствительность в УФ-области спектра. На рис. 2 показаны типичные вольт-амперные характеристики четырех образцов из партии исследуемых структур Ni–ZnSe(Te)–In для прямого и обратного смещения на фотодиоде.

Зависимость емкости C_0 УФ-фотоприемника от частоты тестового сигнала f может быть слабой (см. рис. 3, кривая 1') или заметно спадающей (кривая 2'), что обусловлено величиной последовательного сопротивления R_s фотодиода, которое в первом случае мало и слабо зависит от частоты (кривая 1''), а во

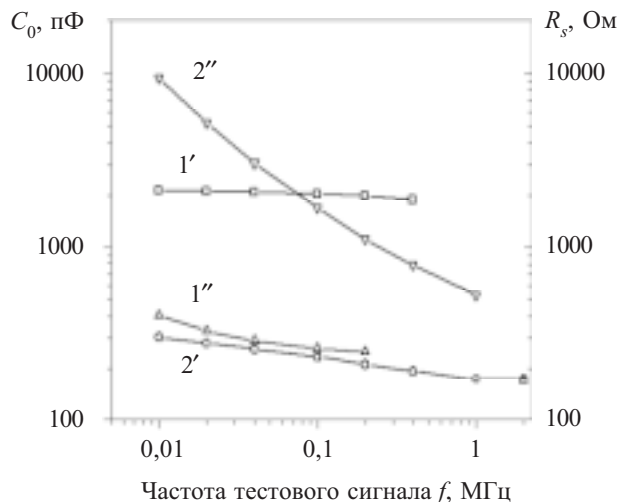


Рис. 3. Зависимость емкости C_0 ($1'$, $2'$) и последовательного сопротивления R_s ($1''$, $2''$) для двух образцов УФ-фотоприемника от частоты f . Напряжение на фотодиоде $U=0$ В

втором случае выше и сильно зависит от частоты (кривая 2''). Следует отметить, что образец с малым R_s и слабой зависимостью от частоты (кривые 1' и 1'') является более предпочтительным практически для всех применений в сравнении с другим образцом (кривые 2' и 2'').

По зависимости емкости от обратного напряжения на фотодиоде получены значения концентрации свободных носителей заряда в приповерхностной области структуры и профиль ее распределения по глубине полупроводника, начиная с глубины около 0,1 мкм от границы раздела «металл—полупроводник» для образцов №1 и 2 (рис. 4).

Значения концентрации свободных носителей заряда в поверхностной области структуры для разных подложек ZnSe находятся в пределах от 10^{15} до 10^{17} см $^{-3}$. Для структур, представленных на рис. 4, эти значения составляют $(1,2—1,6) \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$. Здесь видно, что

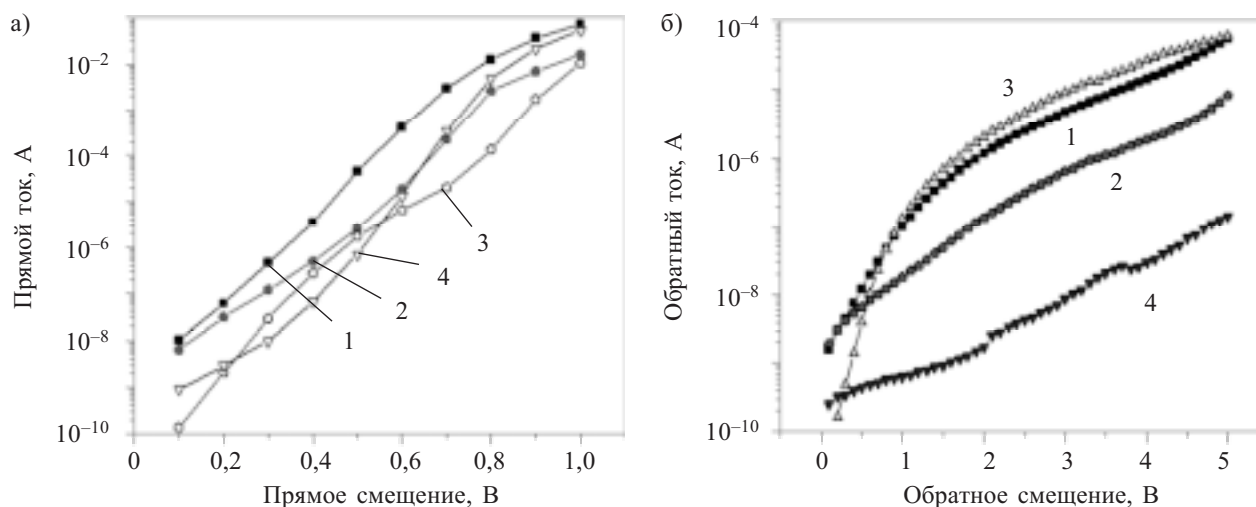


Рис. 2. Прямые (а) и обратные (б) ветви вольт-амперных характеристик четырех образцов УФ-фотоприемников на ZnSe(Te)

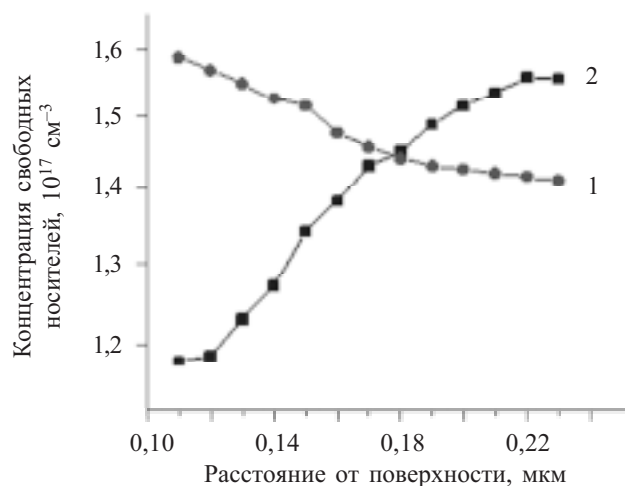


Рис. 4. Профили распределения концентрации свободных носителей заряда в приповерхностной области ZnSe под барьерным электродом для двух образцов УФ-фотодиодов (см. рис. 2)

профили распределения концентрации свободных носителей заряда по глубине полупроводника могут быть как с повышением, так и с понижением концентрации от поверхности раздела «металл—полупроводник».

Спектральные характеристики УФ-фотодиодов на основе барьеров Шоттки Ni–ZnSe(Te)–In измерялись с помощью установки ИДНМ4.011.00.00, предназначенной для измерения спектральных характеристик чувствительности электронно-оптических приборов. Усредненная спектральная характеристика УФ-фотодиодов на основе барьера Шоттки Ni–ZnSe(Te)–In показана на рис. 5.

Фотоэлектрические параметры разработанных УФ-фотодиодов на ZnSe измерялись по стандартным методикам [21]. Измерение нелинейности энергетической характеристики производилось с помощью установки ИДНМ4.004.00.00 методом сложения оптических потоков излучения от двух источников (ртутных ламп ДРТ-220).

Токовая монохроматическая чувствительность фотодиодов к излучению с длиной волны 400 нм

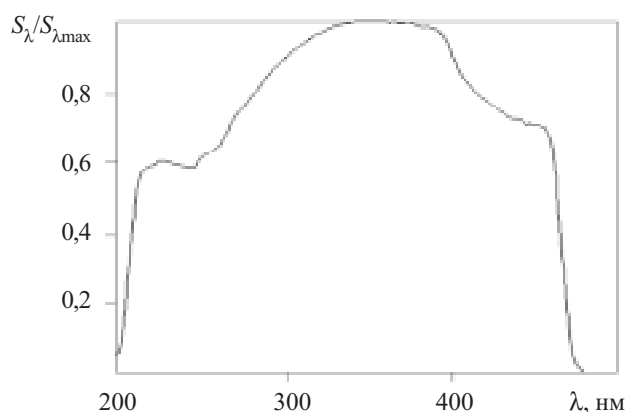


Рис. 5. Усредненная типичная спектральная характеристика УФ-фотодиодов на основе барьеров Шоттки Ni–ZnSe(Te)–In.

измерялась в области максимума спектральной характеристики и составляла 0,096—0,1 А/Вт. Нелинейность энергетической характеристики в диапазоне $1 \cdot 10^{-4}$ — $2 \cdot 10^2$ Вт/м² не превышала 1,0%, темновой ток при рабочем напряжении 100 мВ не превышал $1 \cdot 10^{-9}$ А.

Также была разработана конструкция и технология сборки фотодиодов с площадью фоточувствительного элемента 64 мм², который собирался из четырех кристаллов с размерами 4×4 мм.

С комплектом соответствующих светофильтров, оптимизированных на выделение спектральных поддиапазонов А, В и С, разработанные фотодиоды способны эффективно измерять потоки УФ-излучения. Это позволяет использовать их в качестве датчиков в приборах, предназначенных для измерения энергетической освещенности УФ-излучением, в том числе в приборах для аттестации рабочих мест в целях профилактики профессиональных заболеваний, вызванных повышенными дозами УФ-облучения.

Проведен также сравнительный анализ измеренных параметров разработанных фотодиодов с барьером Шоттки на основе селенида цинка (ZnSe–Ni) и серийных фотодиодов на основе фосфида галлия (см. таблицу).

Сравнение параметров разработанных и серийных фотодиодов

Параметр	Тип фотодиода		
	УФД 20 (GaP–SnO ₂) [5, 22]	ФД-УФ1 (GaP–Au) [6]	ФД ZnSe–Ni
Площадь фоточувствительного элемента, мм ²	49	10	16
Максимальные значения темнового тока при $U=1$ В, нА, не более	5	5	1
Монохроматическая чувствительность к излучению с длиной волны $\lambda=400$ нм, А/Вт	0,18	0,110	0,10
Спектральный диапазон, нм	220—500	190—530	200—480
Длина волны максимума спектральной чувствительности, нм	430	370	330—370
Емкость при $f=1$ МГц, $U=0$ В, пФ, не более	8000	6000	2000
Нелинейность энергетической характеристики в диапазоне энергетической освещенности $1 \cdot 10^{-4}$ — $2 \cdot 10^2$ Вт/м ² , %, не более	1	1	1

Параметры фотодиодов, приведенные в таблице, измерены на выборках приборов, поставленных для комплектования серийных ультрафиолетовых радиометров и дозиметров: 30 фотодиодов на основе GaP–Au (ФД-УФ1), 20 фотодиодов на основе GaP–SnO₂ (УФД 20) и 20 фотодиодов на основе ZnSe–Ni.

Измерения параметров фотодиодов проводились по стандартным методикам, разработанным в НПФ «Тензор» и утвержденным соответствующими органами Госкомитета Украины по вопросам технического регулирования и потребительской политики.

Величина токовой монохроматической чувствительности к излучению с длиной волны 400 нм фотодиодов с барьерами Шоттки на основе селенида цинка и фосфида галлия примерно одинакова — 0,1 А/Вт, однако площадь фоточувствительного элемента фотодиода на ZnSe–Ni больше, чем площадь фотодиода на GaP–Au. Чувствительность же фотодиода УФД 20 существенно выше. Фотодиод на основе ZnSe–Ni менее чувствителен в видимой области спектра (край поглощения — на длине волны 480 нм), чем аналоги, что важно при измерении потоков ультрафиолетового излучения. Все фотодиоды имеют примерно одинаковую нелинейность энергетической характеристики, а обратный ток фотодиодов на основе GaP–Au и GaP–SnO₂ больше, чем у фотодиода на основе ZnSe–Ni. Существенным преимуществом фотодиода на основе селенида цинка является то, что на частоте 1 МГц и нулевом смещении его емкость в 3–4 раза меньше, чем у фотодиодов на основе фосфида галлия, что дает преимущества при применении в высокочастотных и импульсных оптико-электронных приборах. Малые значения темнового тока характеризуют низкий уровень шумов, что позволяет повысить чувствительность и дает преимущество при регистрации слабых сигналов.

Выводы

Таким образом, исследования электрофизических и фотоэлектрических характеристик разработанных фотодиодов Шоттки на основе Ni–ZnSe(Te,O)–In показали, что они могут быть применены в приборах для радиометрии и дозиметрии УФ-излучений в диапазонах УФА, УФВ и УФС.

Существенным отличием фотодиодов на ZnSe от аналогов является их малая емкость и низкое значение темнового тока.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Курик М. Людина й ультрафіолет.— Київ: Рада, 2003.
- ДНАОП 0.03-3.17-88. Санітарні норми УФ випромінювання у виробничих приміщеннях (№ 4557-88).
- International commission of illumination, 1993 (Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement. ICI TC-3.07)
- Добровольский Ю. Г., Рюхтин В. В., Шимановский А. Б. Кремниевые *p-n*-фотодиоды для ближней ультрафиолетовой области спектра // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2001.— № 4—5.— С. 44—46.
- Биксей М. П., Добровольский Ю. Г., Шабашкевич Б. Г. Фотоприемник ультрафиолетового излучения на основе фосфида галлия // Прикладная физика.— 2005.— № 4.— С. 97—100.
- <http://www.mery.spb.ru>
- Verenchikova T. D., Sankin V. I. Ultraviolet photodetector using a Cr-SiC surface-barrier diode // Sov. Tech. Phys. Lett.— 1988.— Vol. 14, N. 10.— P. 756—758.
- Xu D., Salvador A., Botchkarev A. E., Kirn W. et al. High speed, low noise ultraviolet photodetectors based on GaN p-i-n and AlGaIn(p)-GaN(i)-GaN(n) structures // Materials Science Forum.— Switzerland: TransTech Publications.— 1998.— Vols. 264—268.— P. 1441—1444.
- Monroy E., Omnes F., Calle F. Wide-bandgap semiconductor ultraviolet photodetectors // Semiconductor Science and Technology.— 2003.— Vol. 18.— P. R33—R51.
- Bouhdada M., Hanzaz F., Vigue J. P., Faurie J. Schottky barrier near-ultraviolet photodetectors based on ZnSe // Active and Passive Electronic Device.— 2005.— Vol. 1.— P. 79—89.
- Гринев В. В., Рыжиков В. Д., Семиноженко В. П. Сцинтилляционные детекторы и системы контроля радиации на их основе.— К.: Наукова думка, 2007.
- Перевертайло В. Л., Попов В. М., Поканевич О. П., Тарасенко Л. И. Дослідження характеристик структур з бар'єром Шотткі Ni-ZnSe та технологія енергоселективних сенсорів УФ випромінювання // III Українська наукова конференція з фізики напівпровідників «УНКФН-3».— Одеса.— 2007.— С. 3—46.
- Perevertaylo V. L., Popov V. M., Pokanovich A. P., Tarasenko L. I. Investigation of ZnSe(Te) from electrophysical characteristics of structures with Schottky barrier // Abstract book of International Conference «Crystal Materials 2007».— Ukraine, Kharkov.— 2007.— P. 165.
- Перевертайло В. Л., Попов В. М., Поканевич А. П., Тарасенко Л. И. ZnSe(Te) – материал для монолитных рентгеновских детекторов // Матер. 15-й междунар. конф. «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики».— Украина, Ялта.— 2007.— С. 43—46.
- Перевертайло В. Л., Добровольский Ю. Г., Шабашкевич Б. Г. Исследование характеристик структур с барьером Шоттки Ni-ZnSe и технологий энергоселективных УФ фотодиодов // Тезисы докладов XX Междунар. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения.— Россия, Москва.— 2008.— С. 103—104.
- Перевертайло В. Л., Добровольский Ю. Г., Шабашкевич Б. Г. Ультрафиолетовый фотодиод с барьером Шоттки на основе Ni-ZnSe // Тези доп. наук.-практ. конф. «Сенсор-2008».— Украина, Одеса.— 2008.— С. 30—31.
- Пат. на корисну модель 42429. Фотодіод з бар'єром Шотткі, чутливий в ультрафіолетовому діапазоні спектру / В. Л. Перевертайло, В. Д. Рижи́ков, Ю. Г. Добровольський та ін.— 2008.— Бюл. № 13.
- Перевертайло В. Л., Попов В. М., Поканевич А. П. и др. Влияние технологических обработок на электрофизические и фотоэлектрические характеристики диода Шоттки на ZnSe // Тр. IX МНПК «Современные информационные и электронные технологии».— Украина, Одесса.— 2008.— Ч. 2.— С. 133.
- Заявка u2009 06302 від 17.06 2009 на видачу патенту України на корисну модель «Фотодіод з бар'єром Шотткі, чутливий в ультрафіолетовому діапазоні спектру» / Перевертайло В. Л., Рижи́ков В. Д., Добровольський Ю. Г. та ін. Позитивне рішення № 10685/1 від 21.09 2009.
- Dobrovolskiy Yu. G., Perevertaylo V. L., Shabashkevich B. G., Pidkamin L. J. Clarifying coverages on the basis of tapes SnO₂, SiO₂, Si₃N₄ for photodiodes of ultraviolet and visible range // SPIE Proc.— 2009.— Vol. 7388.— P. 63—69.
- ГОСТ17772-88. Приемники излучения. Полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определение характеристик.
- <http://www.tenzor.org.ua>

Оптимизация ЭС должна рассматриваться, во-первых, в аспекте достижения максимальной технико-экономической эффективности от использования самой НК, например минимизации стоимости, при условии соответствия ее технических характеристик требованиям технического задания (ТЗ) на разработку ЭС и, во-вторых, в аспекте минимизации затрат на разработку и изготовление ЭС с учетом необходимости использования дополнительных элементов конструкции, обеспечивающих размещение (компоновку) электронных компонентов (ЭК), создание электрических соединений, электромагнитную совместимость (ЭМС), нормальный тепловой режим, защиту от внешних воздействующих факторов (ВВФ).

Другими словами, можно использовать дешевую НК, но потерять на следующем этапе проектирования, усложняя конструкцию ЭС, и наоборот, выбор более дорогой НК может привести к упрощению разработки ЭС. С этих позиций и необходимо рассматривать процесс оптимизации выбора НК.

Выбор оптимального варианта НК можно вести по трем направлениям:

- 1) по ее минимальной стоимости;
- 2) по минимальной стоимости ЭС, в состав которого входит НК;
- 3) по максимальным показателям эффективности ЭС, в состав которого входит НК.

Эти варианты не равноценны как с точки зрения программной реализации, так и с позиций достоверности результатов оптимизации.

Ниже приведены математические модели оптимизации, соответствующие рассмотренным направлениям.

Модели выбора НК

1. Минимизация стоимости НК.

В этом случае модель выбора имеет вид

$$K_1 = \min \left(C + \sum_{j=1}^m t_j \right) \quad (1)$$

при ограничениях

$a_i \leq d_i$ (для случая, когда параметры ЭС максимизируются);

$b_i \geq g_i$ (для случая, когда параметры ЭС минимизируются);

$p_s \equiv f_s$ (для параметров качественной оценки).

Здесь:

C — стоимость комплекта НК, выбранного из n предлагаемых базовых комплектов НК, $C = \{c_1, c_2, \dots, c_p, \dots, c_n\}$;

t_j — стоимость j -го дополнительного элемента НК;

m — количество дополнительных элементов НК (аксессуаров), необходимых для создания ЭС;

a_i, b_i, p_s — заданные параметры ЭС (известные условия задачи);
 d_i, g_i, f_s — параметры, которые обеспечиваются НК.

Предполагается, что в результате перебора множества НК в пространстве поиска, заданным ограничениям будет удовлетворять какое-то подмножество НК. Оптимальной НК будет считаться та, которая имеет минимальную стоимость.

2. Минимизация стоимости ЭС, в состав которого входит НК.

Модель выбора можно представить следующим образом:

$$K_2 = \min \left(C + \sum_{j=1}^m t_j + \sum_{j=1}^v u_j \right) = \min \left(K_1 + \sum_{j=1}^v u_j \right) \quad (2)$$

при ограничениях, аналогичных ограничениям для (1), с учетом того, что d_i, g_i, f_s — параметры, которые обеспечиваются как НК, так и дополнительными элементами механической структуры.

Здесь u_j — стоимость j -го дополнительного элемента механической структуры; v — количество дополнительных элементов механической структуры, которые появляются в результате разработки вариантов конструкции ЭС.

Для использования этой модели необходимо разработать в эскизном виде варианты конструкции ЭС на базе НК, которые по результатам проверки на предыдущем этапе удовлетворяют заданным ограничениям.

Эта модель более трудоемка с точки зрения реализации, однако и результаты выбора НК, очевидно, будут лучшими.

3. Максимизация показателей эффективности ЭС, в состав которого входит НК.

Модель в этом случае имеет вид

$$K_3 = \max \sum_{j=1}^z K_j \quad (3)$$

при тех же ограничениях, что и в (2).

Здесь K_j — частный критерий оценки ЭС; z — количество частных критериев.

Для решения задачи выбора оптимального варианта конструкции ЭС и, соответственно, варианта НК используем теорию пассивных игр. С ее помощью могут успешно решаться задачи с неполной исходной информацией [7].

Составляем игровую матрицу, строки которой соответствуют вариантам конструкции ЭС (иначе — стратегиям конструктора) S_i , а столбцы — частным критериям оценки ЭС K_j . В ячейки игровой матрицы заносятся достигнутые значения Π_{ij} частных критериев оценки, соответствующие различным вариантам конструкции S_i (табл. 1).

Среди частных критериев есть такие, которые максимизируются, и такие, которые минимизируются. Для того чтобы в дальнейшем выполнить свертку всех частных критериев в интегральный, необходимо их

Таблица 1

Вариант конструкции ЭС	K_1	K_2	...	K_j	...	K_z
S_1	Π_{11}	Π_{12}	...	Π_{1j}	...	Π_{1z}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
S_i	Π_{i1}	Π_{i2}	...	Π_{ij}	...	Π_{iz}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
S_m	Π_{m1}	Π_{m2}	...	Π_{mj}	...	Π_{mz}

представить таким образом, чтобы можно было их объединять, например, в виде суммы.

Представим все частные критерии в виде показателей эффективности $\mathcal{E}_{ij}$ (выигрышей), которые всегда максимизируются:

— для максимизируемых частных критериев

$$\mathcal{E}_{ij} = K_j / E_i,$$

— для минимизируемых частных критериев

$$\mathcal{E}_{ij} = \frac{1}{K_j E_i},$$

где E_i — стоимость i -го варианта конструкции ЭС.

Представление показателей эффективности относительно стоимости позволяет использовать для оценки вариантов конструкции соотношение «качество/стоимость», т. е. одновременно с решением технической задачи учитываются и экономические составляющие.

Определив показатели эффективности, построим матрицу выигрышей (табл. 2).

Таблица 2

Вариант конструкции ЭС	K_1	K_2	...	K_j	...	K_z
S_1	$\mathcal{E}_{11}$	$\mathcal{E}_{12}$	...	$\mathcal{E}_{1j}$	...	$\mathcal{E}_{1z}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
S_i	$\mathcal{E}_{i1}$	$\mathcal{E}_{i2}$	...	$\mathcal{E}_{ij}$	...	$\mathcal{E}_{iz}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
S_m	$\mathcal{E}_{m1}$	$\mathcal{E}_{m2}$	...	$\mathcal{E}_{mj}$	...	$\mathcal{E}_{mz}$

Используемые частные критерии оценивают разные по физической природе параметры, которые могут быть размерными и не имеющими размерности, при этом значения каждого j -го критерия могут существенно отличаться между собой по величине. Поэтому произведем нормирование значений показателей эффективности, которые из них получены, используя следующее соотношение

$$\mathcal{E}_{ijn} = \frac{\mathcal{E}_{ij}}{\mathcal{E}_{ij\max}},$$

где $\mathcal{E}_{ijn}$ — нормированное значение показателя эффективности ($\mathcal{E}_{ijn} \leq 1$);

$\mathcal{E}_{ij\max}$ — максимальное значение показателя эффективности по каждому частному критерию (в каждом столбце матрицы).

Не все частные критерии, равно как и их показатели эффективности, одинаково влияют на интегральный (обобщенный) показатель. Степень влияния можно учесть, умножив элементы матрицы (показатели эффективности) на коэффициенты весовости, которые можно определить, например, экспертным путем.

В результате получаем пронормированную взвешенную матрицу (табл. 3).

По подготовленной таким образом матрице можно определить лучший вариант конструкции ЭС —

Таблица 3

Вариант конструкции ЭС	K_1	K_2	...	K_j	...	K_z
S_1	$\mathcal{E}_{11n}^*$	$\mathcal{E}_{12n}^*$	...	$\mathcal{E}_{1jn}^*$	...	$\mathcal{E}_{1zn}^*$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
S_i	$\mathcal{E}_{i1n}^*$	$\mathcal{E}_{i2n}^*$	...	$\mathcal{E}_{ijn}^*$	...	$\mathcal{E}_{izn}^*$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
S_m	$\mathcal{E}_{m1n}^*$	$\mathcal{E}_{m2n}^*$	...	$\mathcal{E}_{mjn}^*$	...	$\mathcal{E}_{mzn}^*$

тот, который в результате свертки частных показателей эффективности даст их максимальную сумму:

$$\mathcal{E}_i = \max \sum_{j=1}^z \mathcal{E}_{ijn}^* \rightarrow S_{i\text{ опт}},$$

где $S_{i\text{ опт}}$ — оптимальный вариант конструкции ЭС.

Реализация третьей модели наиболее трудоемка, однако она позволяет расширить пространство поиска и получить наилучшие результаты по оптимизации конструкции ЭС в задачах выбора НК.

Основная трудность состоит в заполнении элементов игровой матрицы, а именно в определении значений частных критериев оценки конструкций ЭС.

В качестве частных критериев оценки ЭС могут быть использованы следующие характеристики: масса; объем; количество крепежных изделий; коэффициент сложности сборки $K_{\text{сб}} = N_{\text{сб}} / N_{\text{э}}$ (где $N_{\text{э}}$ — число элементов НК, $N_{\text{сб}}$ — число элементов НК, требующих регулировки в составе ЭС); электромагнитная совместимость; обеспечение требуемого теплового режима; стойкость к механическим воздействиям; стойкость к климатическим воздействиям; ремонтопригодность; требуемый уровень эргономического и художественно-конструкторского обеспечения.

С целью сокращения затрат и с учетом того, что выбор НК проводится на начальных стадиях проектирования ЭС, целесообразно значения последних шести частных критериев оценки определять посредством экспертных оценок.

Алгоритмы выбора НК

В соответствии с представленными моделями разработаны алгоритмы (рис. 2—4), которые позволяют с разной степенью точности и при различных затратах проводить выбор НК для ЭС.

Алгоритмы имеют модульную структуру. Алгоритм, соответствующий модели 1, служит начальной частью для построения алгоритма реализации модели 2. Развивая его, получаем алгоритм для модели 3, который является самым сложным и позволяет с наибольшей степенью точности вести выбор НК для ЭС. Рассмотрим отдельно каждый из них.

1. Выбор НК по показателям стоимости.

Алгоритм выбора представлен в обобщенном виде на рис. 2. Выбор НК проводится в соответствии с требованиями ТЗ. Введение и сравнение параметров ЭС с параметрами НК осуществляется в определенной последовательности. В итоге получаем список (подмножество) НК, которые удовлетворяют требованиям ТЗ. Из отобранных НК выбираем оптимальную.

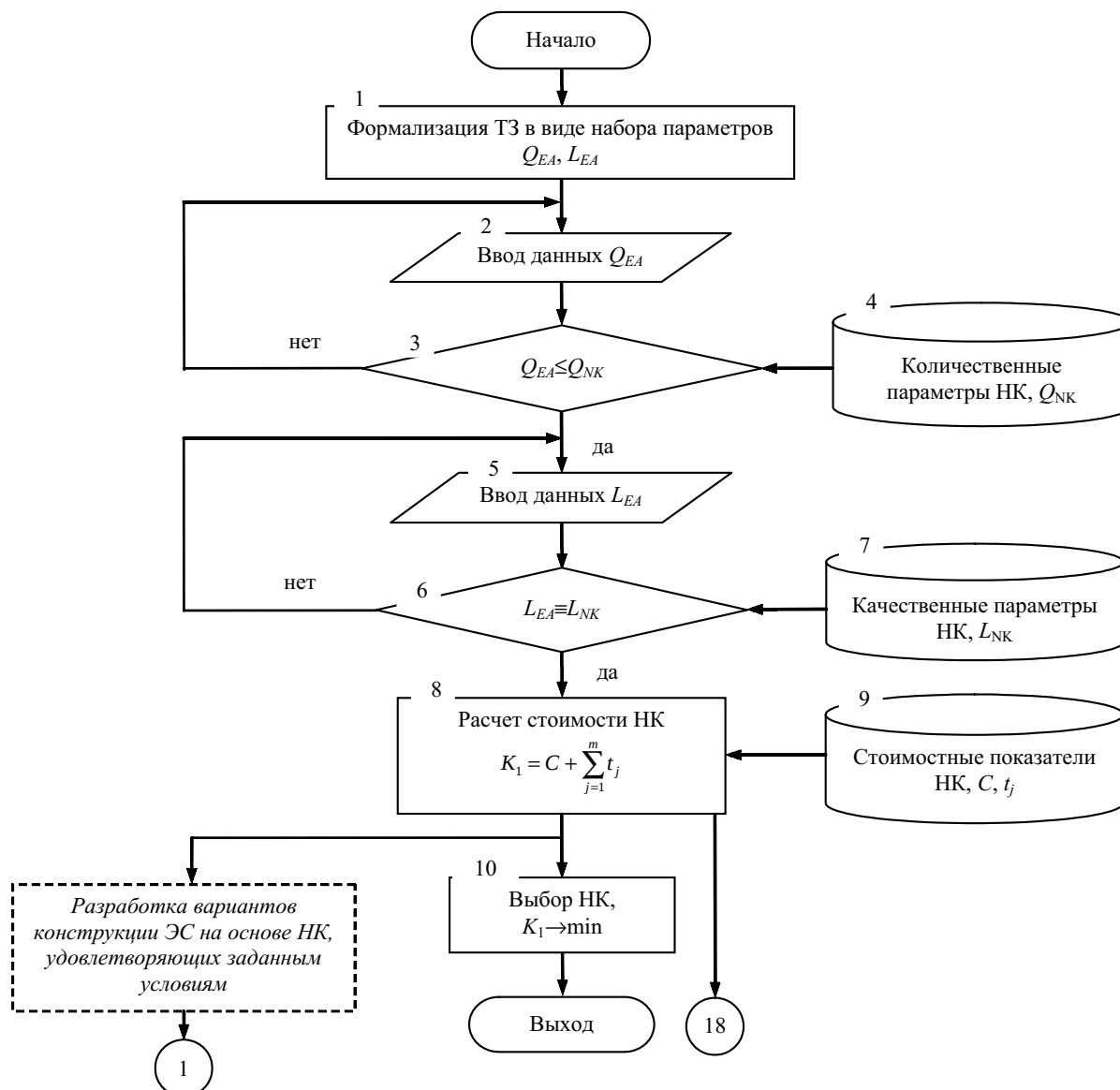


Рис. 2. Алгоритм выбора НК по показателю ее стоимости

Блок 1. Формализация требований ТЗ для представления их в виде набора параметров (ограничений) Q_{EA} , L_{EA} для возможности последующей обработки.

Блок 2. Ввод данных Q_{EA} (набор количественных параметров ЭС): M_{EA} — масса; V_{EA} — объем; W_{EA} — ширина; H_{EA} — высота; D_{EA} — длина; $S_{PP\ EA}$ — площадь печатных плат; $S_{KP\ EA}$ — площадь соединительных плат; $S_{LP\ EA}$ — площадь лицевой панели; $V_{KZ\ EA}$ — объем коммутационной зоны; $P_{V\ EA}$ — мощность, выделяемая в виде тепла.

Блок 3. Выбор вариантов НК из базы данных (блок 4) по заданным параметрам Q_{EA} . При невозможности отыскания НК с заданными параметрами разработчик вправе изменить свои требования.

Блок 4. База данных с количественными параметрами НК Q_{NK} : M_{NK} , V_{NK} , W_{NK} , H_{NK} , D_{NK} , $S_{PP\ NK}$, $S_{KP\ NK}$, $S_{LP\ NK}$, $V_{KZ\ NK}$, мощность, рассеиваемая при естественной конвекции $P_{V\ NK}$. Кроме последнего,

названия этих параметров НК соответствуют названиям параметров ЭС.

Блок 5. Ввод данных L_{EA} (набор качественных параметров ЭС): Nr_{EA} — наличие ручек; Nrp_{EA} — наличие ручек-подставок; Nkr_{EA} — наличие кронштейнов для крепления; Nn_{EA} — наличие ножек; Vum_{EA} — вертикальная установка модулей I уровня; Gum_{EA} — горизонтальная установка модулей I уровня; Kum_{EA} — комбинированная установка модулей I уровня; $Olpr_{EA}$ — общая лицевая панель; Lp_{EA} — лицевая панель в составе модулей I уровня; Np_{EA} — наличие перфорации; Mpo_{EA} — возможность установки модулей принудительного охлаждения; Opo_{EA} — возможность установки отдельных элементов принудительного охлаждения; Ov_{EA} — наличие отсеков для вентиляции; Sv_{EA} — стойкость к вибрации; Su_{EA} — стойкость к ударам; Ki_{EA} — климатическое исполнение; Nee_{EA} — наличие элементов экранирования.

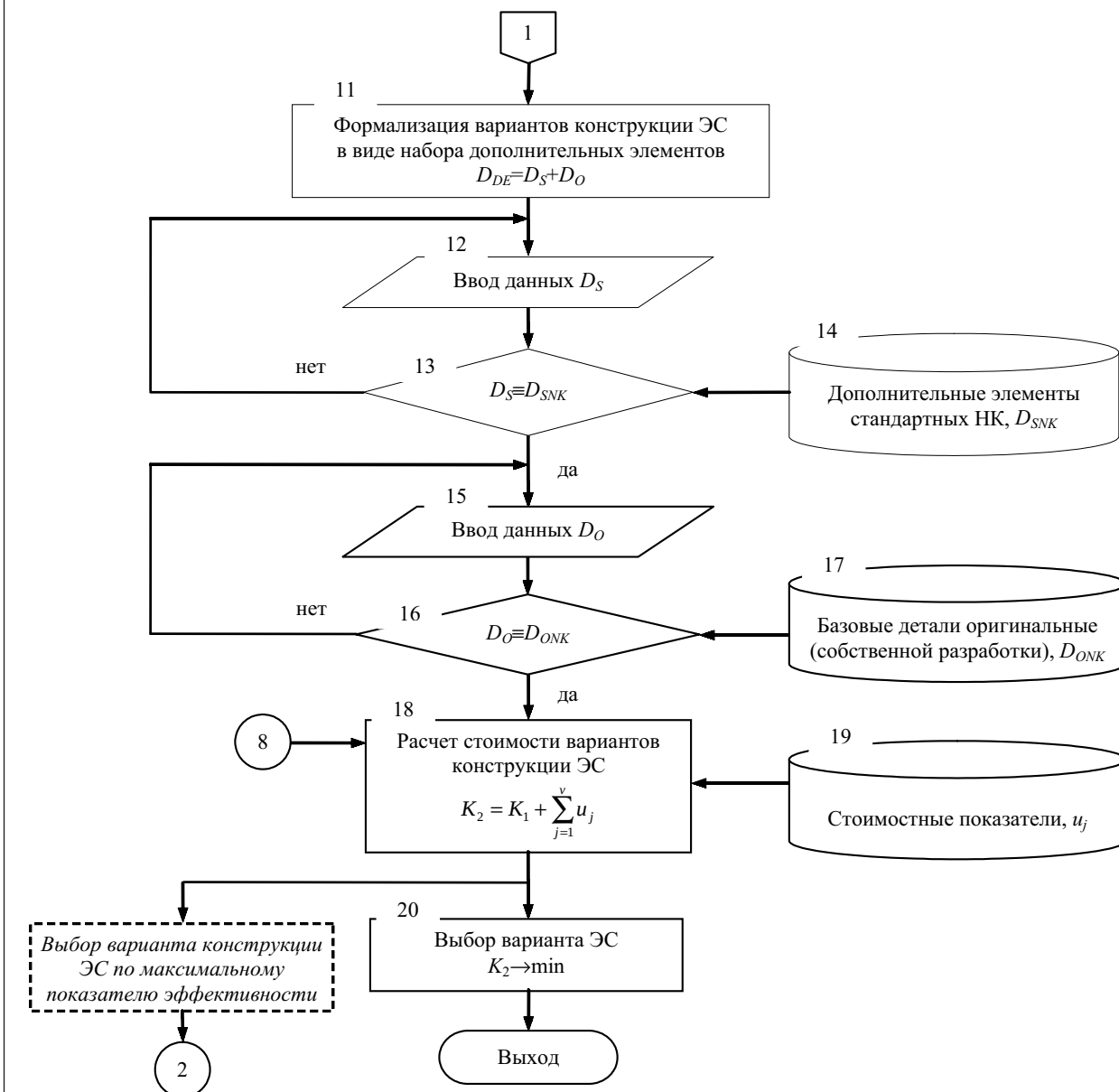


Рис. 3. Алгоритм выбора НК по показателям стоимости ЭС (продолжение рис. 2)

Блок 6. Выбор НК из списка НК, выбранных на предыдущих этапах, параметры L_{NK} которых удовлетворяют заданным параметрам L_{EA} . При невозможности выбора НК с заданными качественными характеристиками, разработчик может «смягчить» свои требования.

Блок 7. База данных с параметрами НК L_{NK} , имеющими качественную оценку: Nr_{NK} , Nrp_{NK} , Nkr_{NK} , Nn_{NK} , Vum_{NK} , Gum_{NK} , Kum_{NK} , Olp_{NK} , Lp_{NK} , Np_{NK} , Mpo_{NK} , Opo_{NK} , Ov_{NK} , Sv_{NK} , Su_{NK} , Ki_{NK} , Nee_{NK} . Названия этих параметров НК соответствуют названиям параметров ЭС.

Блок 8. Расчет стоимости НК, которые соответствуют требованиям разрабатываемого ЭС на основании базы данных (блок 9).

Блок 9. База данных со стоимостными показателями базовых комплектов НК (С) и дополнительных элементов (t_j).

Блок 10. Из полученного подмножества НК выбираем НК с минимальной стоимостью.

2. Выбор НК с учетом разработки вариантов конструкции ЭС и сравнения их по показателю стоимости.

Алгоритм выбора представлен на рис. 2, 3.

По результатам полученного подмножества НК, удовлетворяющего заданным ограничениям, разрабатывается соответствующее количество вариантов конструкции ЭС, которые дополняются необходимыми конструктивными элементами, связанными с обеспечением ЭМС, защитой от ВВФ, обеспечением тепловых режимов, созданием электрических соединений. Выбирается из них тот, стоимость которого будет наименьшей. Дополнительные конструктивные элементы могут быть как стандартными (D_S), так и оригинальными (D_O), т. е. могут представлять собой детали собственной разработки.

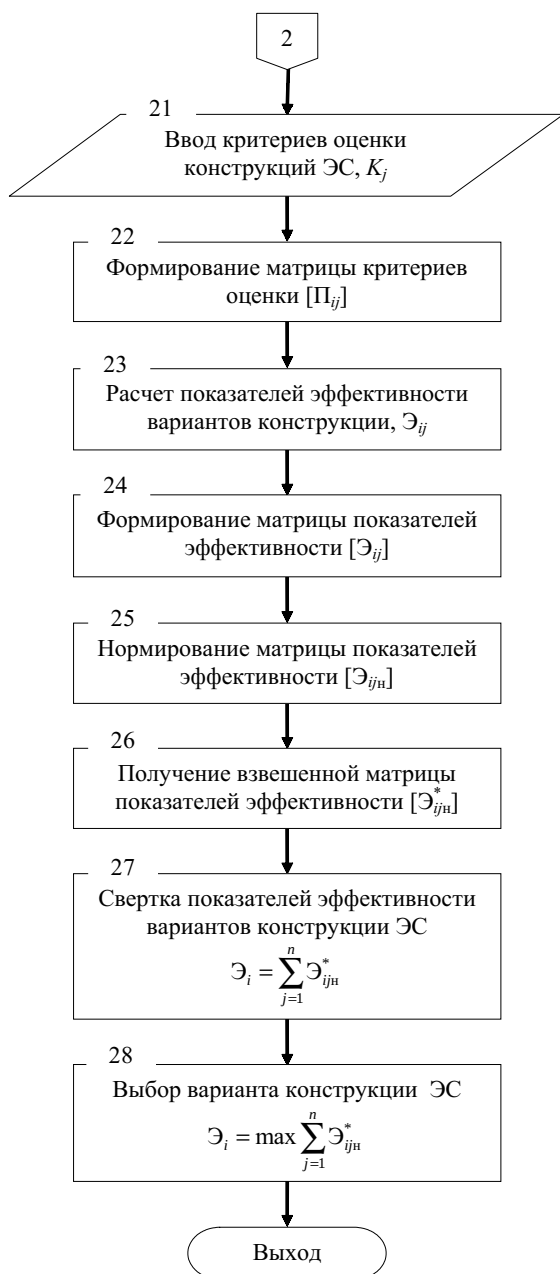


Рис. 4. Алгоритм выбора НК по показателям эффективности ЭС (продолжение рис. 2 и 3)

Блок 11. Представление вариантов конструкции в виде набора дополнительных элементов D_{DE} .

Блок 12. Ввод дополнительных элементов, которые предположительно могут быть стандартными.

Блок 13. Сравнение введенных элементов с элементами стандартных НК, представленных в базе данных (блока 14). Если существует несоответствие, то оно может быть устранено путем некоторой доработки варианта конструкции ЭС.

Блок 15. Ввод дополнительных элементов, которые являются оригинальными (сюда попадают элементы, которые не определились как стандартные).

Блок 16. Сравнение введенных элементов с элементами, представленными в базе данных блока 17.

Если некоторых элементов в базе данных нет, то может быть проведена доработка этих элементов до уровня соответствия или же пополнение базы данных новыми элементами.

Блок 18. Проводится расчет стоимости разработанных вариантов конструкции ЭС. При этом используются данные по стоимости НК (составляющей K_1), полученные в блоке 8, и данные из блока 19.

Блок 19. База данных со стоимостными показателями (u_j) дополнительных элементов механической структуры.

Блок 20. Выбор варианта конструкции с наименьшей стоимостью.

3. Выбор НК с учетом разработки вариантов конструкции ЭС и сравнения их по показателям эффективности ЭС.

Алгоритм выбора представлен на рис. 2, 3, 4.

Проводится расчет показателей эффективности для каждого варианта конструкции и выбирается из них тот вариант, обобщенный показатель эффективности которого будет максимальным.

Содержание блоков алгоритма, представленного на рис. 4, соответствует методу решения задачи оптимизации, который подробно описан выше.

Разработанные модели и алгоритмы позволяют подойти к практической реализации выбора оптимальных НК с различной степенью детализации на ранних стадиях проектирования для различных условий разработки и производства ЭС, удовлетворяя разнообразные запросы разработчиков и производителей ЭС.

Дальнейшее применение моделей и алгоритмов целесообразно развивать в направлении создания программного продукта и баз данных, что позволит использовать средства автоматизированного проектирования для оптимизации и ускорения процесса проектирования ЭС.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Несущие конструкции радиоэлектронной аппаратуры / Под ред. П. И. Овсичера. — М.: Радио и связь, 1988.
2. Лутченков Л. С. Оптимальное проектирование несущих конструкций как сложных систем. — Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990.
3. Лутченков Л. С. Автоматизированное проектирование несущих конструкций РЭС. — М.: Радио и связь, 1991.
4. Ефименко А. А. Создание системы базовых несущих конструкций — требование времени // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 1993. — № 3—4. — С. 10—12.
5. Ефименко А. А. Проблемы развития базовых несущих конструкций для современных радиоэлектронных средств // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 1997. — № 3. — С. 9—13.
6. Ефименко А. А., Вильчинский А. И. Модель электронных средств, разрабатываемых на основе стандартных несущих конструкций // Тр. 10-й Междунар. науч.-практич. конф. «СИЭТ-2009». — Одесса. — 2009. — Т II. — С. 35.
7. Фролов В. А. Анализ и оптимизация в прикладных задачах конструирования РЭС: Учеб. пособие. — К.: Выща шк., 1991.

К. т. н. В. В. ВАСИЛЕВСКИЙ, к. т. н. В. Г. ГОЛОВАНЬ,
к. т. н. А. В. ГОЛОВАНЬ, к. ф.-м. н. М. А. ДРОЗДОВ,
к. т. н. Т. А. ХИЖНЯК

Украина, г. Одесса, Военный институт ОНПУ;
г. Киев, НТУУ «Киевский политехнический институт»
E-mail: drozd48@mail.ru

Дата поступления в редакцию
03.12 2009 г.

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

СПОСОБ ИСКАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ОБЪЕКТОВ

Предлагается способ подавления сигналов, отражаемых объектом, с целью защиты его от обнаружения. В основу положен метод искусственного формирования провалов диаграммы обратного вторичного излучения антенной системы.

Известно, что любая антенна даже при наилучшем согласовании с нагрузкой рассеивает в окружающее пространство некоторую часть энергии электромагнитных волн (ЭМВ), которые падают на нее. Максимально снизить эффект рассеяния можно не только снижением суммарной мощности рассеяния по всем направлениям. Авторы предлагают уделить внимание формированию необходимой диаграммы рассеяния [1] или диаграммы обратного вторичного излучения (ДОВИ). Изменяя ее тем или иным способом, можно резко снижать рассеяние в целых секторах обзора и даже получать нули диаграммы рассеяния в нужных направлениях.

Диаграмма рассеяния системы отражателей (например, антенной решетки) определяется произведением диаграммы рассеяния антенного элемента использованного типа на комплексный множитель рассеяния системы [2, с. 189]:

$$\sigma_{\Sigma}(\epsilon, \theta) = \sigma_0(\epsilon, \theta)R(\epsilon, \theta), \quad (1)$$

где $\sigma_0(\epsilon, \theta)$ — моностатическая или бистатическая эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) элемента системы; $R(\epsilon, \theta)$ — моностатическая или бистатическая индикатриса рассеяния решетки как системы отражателей (отождествляется с квадратом модуля комплексного множителя системы, работающей на излучение или на прием [2]).

Из выражения (1) видно, что нулевого рассеяния на системе отражателей в заданном направлении можно достичь путем изменения $\sigma_0(\epsilon, \theta)$, путем управления индикатрисой рассеяния $R(\epsilon, \theta)$, а также в результате одновременного управления параметрами $\sigma_0(\epsilon, \theta)$ и $R(\epsilon, \theta)$.

Определим пути управления параметром $R(\epsilon, \theta)$. Для этого рассмотрим двухэлементную решетку, т. е. решетку, имеющую два канала, которые объединяются сумматором Σ (рис. 1). Первый канал не имеет весового усилителя, а второй включает в себя усилитель с комплексным коэффициентом усиления k .

Найдем условия, при которых на выходе сумматора обеспечивается минимум мощности сигналов, принятых с любого направления.

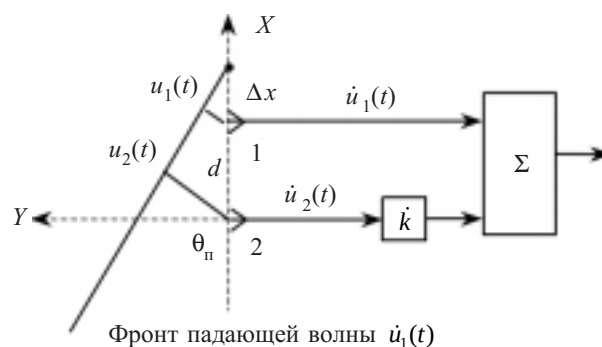


Рис. 1. Антенная решетка с двумя элементами, каналами и сумматором

Суммарный сигнал на выходе решетки можно записать в виде

$$\dot{u}_{\Sigma}(t) = \dot{u}_1(t) + k\dot{u}_2(t), \quad (2)$$

где $\dot{u}_1(t)$, $\dot{u}_2(t)$ — сигналы, принятые по соответствующим каналам.

Выражение (2) можно представить следующим образом:

$$\dot{u}_{\Sigma}(t) = u_1(t)e^{j\varphi_1} + k u_2(t)e^{j\varphi_2}, \quad (3)$$

где φ_1 и φ_2 — приращения фаз сигналов в соответствующих каналах.

Формулу для мощности сигналов на выходе двухэлементной решетки можно записать в виде

$$\begin{aligned} \overline{\dot{u}_{\Sigma}(t)u_{\Sigma}^*(t)} &= \overline{[u_1(t)e^{j\varphi_1} + k u_2(t)e^{j\varphi_2}][u_1(t)e^{-j\varphi_1} + k^* u_2(t)e^{-j\varphi_2}]} = \\ &= \overline{u_1(t)u_1(t) + k^* u_1(t)u_2(t)e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} +} \\ &+ \overline{k u_1(t)u_2(t)e^{j(\varphi_2 - \varphi_1)} + k k^* u_2(t)u_2(t)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Считая, что антенные элементы решетки однородны и изотропны и находятся на небольшом расстоянии один от другого, а каналы идентичны, можно предположить, что

$$u_1(t) \approx u_2(t). \quad (5)$$

В таком случае выражение (4) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} \sigma_{\Sigma}^2(t) &= \sigma_1^2 + k^* \sigma_1^2 \rho_{12}(t)e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} + \\ &+ k \sigma_1^2 \rho_{12}(t)e^{j(\varphi_2 - \varphi_1)} + k k^* \sigma_1^2. \end{aligned} \quad (6)$$

Найдем первую производную мощности по $\dot{k}$:

$$\frac{d\sigma_{\Sigma}^2(t)}{dk} = \sigma_1^2 \rho_{12}(t) e^{j(\varphi_2 - \varphi_1)} + \dot{k} * \sigma_1^2. \quad (7)$$

Если приравнять полученную производную к нулю, получим

$$\dot{k}^* = -\rho_{12}(t) e^{j(\varphi_2 - \varphi_1)} \quad (8)$$

или

$$\dot{k} = -\rho_{12}(t) e^{-j(\varphi_2 - \varphi_1)}. \quad (9)$$

Анализ соотношения (9) показывает, что для получения контролируемого провала в диаграмме направленности двухэлементной решетки следует устанавливать коэффициент усиления весового усилителя таким, чтобы он, во-первых, компенсировал сдвиг фаз между каналами, и, во-вторых, после такой компенсации обеспечивал инверсию сигналов в каналах.

Подставим выражение (9) в формулу (3) и учтем, что в соответствии с предположением (5) напряжения каналов практически равны, т. е. $u_1(t) = u_2(t)$. В результате получим

$$\dot{u}_{\Sigma}(t) = u_1(t) e^{j\varphi_1} - \rho_{12}(t) u_1(t) e^{j\varphi_1}. \quad (10)$$

При достаточной корреляции входных сигналов, т. е. при $\rho_{12} = 1$, выходное напряжение $\dot{u}_{\Sigma}(t)$ обращается в ноль.

Операцию установки необходимого коэффициента усиления весового усилителя выполняет известный корреляционный автокомпенсатор активных шумовых помех (КАКАШП) (рис. 2).

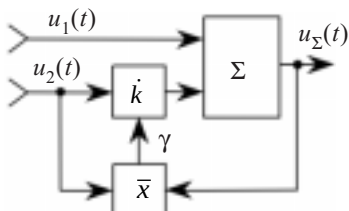


Рис. 2. Блок-схема корреляционного автокомпенсатора активных шумовых помех

Коэффициент усиления весового усилителя такого автокомпенсатора:

$$\dot{k} = \gamma \dot{u}_{\Sigma}(t) \dot{u}_2^*(t), \quad (11)$$

где γ — коэффициент усиления цепи корреляционной обратной связи.

С учетом формулы (3) и предположения (5), перепишем выражение (11) в таком виде:

$$\begin{aligned} \dot{k} &= \gamma [u_1(t) e^{j\varphi_1} + \dot{k} u_2(t) e^{j\varphi_2}] \dot{u}_2^*(t) = \\ &= \gamma \sigma_1^2 \rho_{12} e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} + \gamma \dot{k} \sigma_1^2, \end{aligned} \quad (12)$$

откуда найдем

$$\dot{k} = \frac{\gamma \sigma_1^2 \rho_{12} e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)}}{1 - \gamma \sigma_1^2}. \quad (13)$$

При $\varphi \rightarrow \infty$ (что является обязательным условием для нормального функционирования КАКАШП) это выражение преобразуется к

$$\dot{k} = -\rho_{12} e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)}, \quad (14)$$

то есть

$$\dot{k} = -\rho_{12} e^{-j(\varphi_2 - \varphi_1)}. \quad (15)$$

Можно видеть, что выражение (15) полностью совпадает с выражением (9), т. е. КАКАШП формирует управляемый провал в диаграмме направленности (на прием).

Оценим рассеивающие возможности двухэлементной адаптивной антенной решетки (ААР), оснащенной автокомпенсатором, иначе говоря, рассчитаем ее индикатрису рассеяния $R(\epsilon, \theta)$. Ограничимся рассмотрением случая, который касается только линейной решетки, т. е. рассчитаем $R(\theta)$.

В соответствии с рис. 1, запишем выражение для поля отражения от элемента ААР1:

$$E_1 = \Delta u \exp \left\{ j\omega t + \frac{2\pi\Delta x}{\lambda} \sin \theta_n + \frac{2\pi\Delta x}{\lambda} \sin \theta_p \right\}, \quad (16)$$

где Δu — уровень сигнала после компенсации;

$\frac{2\pi\Delta x}{\lambda} \sin \theta_n$ — фаза сигнала u_1 до компенсации;

θ_n — угол падения ЭМВ;

θ_p — угол рассеяния (наблюдения).

Соотношение для поля отражения от элемента 2 с учетом выражений (9) и (15), а также при условии $\rho_{12} \approx 1$, приобретает вид

$$\begin{aligned} E_2 &= -\Delta u \exp \left\{ j\omega t + \frac{2\pi(d + \Delta x)}{\lambda} \sin \theta_n - (\varphi_2 - \varphi_1) - \right. \\ &\quad \left. - (\varphi_2 - \varphi_1) + \frac{2\pi(d + \Delta x)}{\lambda} \sin \theta_p \right\}, \end{aligned} \quad (17)$$

где d — расстояние между осями элементов антенной решетки;

$(\varphi_2 - \varphi_1)$ — фазовый сдвиг между каналами, $(\varphi_2 - \varphi_1) = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_n$.

Исходя из законов геометрической оптики, Δx может выбираться произвольно. Принимаем $\Delta x = 0$. Тогда выражение для поля сумматора E_{Σ} может быть записано в виде

$$E_{\Sigma} = E_1 + E_2 = \Delta u \exp(j\omega t) \{1 - e^{j\psi}\}, \quad (18)$$

где $\psi = \frac{2\pi\lambda}{d} (\sin \theta_p - \sin \theta_n)$.

Множитель в фигурных скобках является комплексным множителем двухэлементной адаптивной антенной решетки:

$$F(\psi) = 1 - e^{j\psi}. \quad (19)$$

Умножив и разделив выражения (19) на $2je^{-j\frac{\psi}{2}}$, получим

$$\begin{aligned} F(\psi) &= \frac{(e^{-j\frac{\psi}{2}} - e^{j\frac{\psi}{2}}) 2j}{e^{-j\frac{\psi}{2}} 2j} = -2j \left(\sin \frac{\psi}{2} \right) e^{j\frac{\psi}{2}} = \\ &= 2 \sin \frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi - \pi}{2}}. \end{aligned} \quad (20)$$

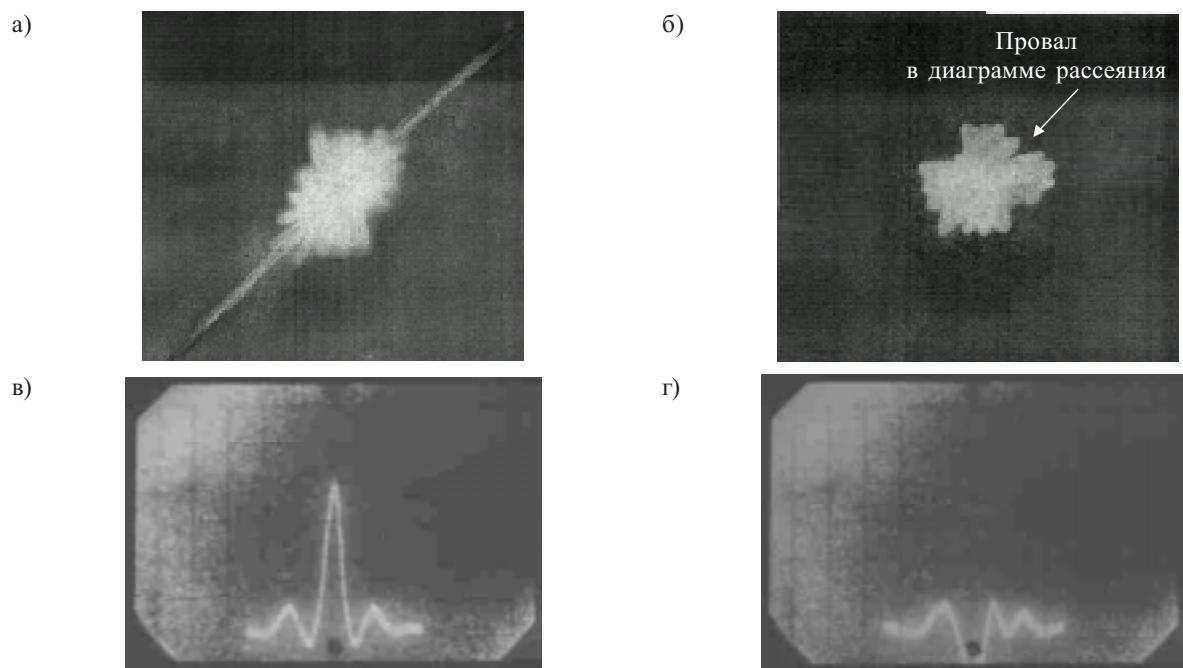


Рис. 3. Диаграмма обратного вторичного излучения ААР (а, б) и ее фрагмент (в, г) при работе без автокомпенсатора (а, в) и при включенном КАКАШП (б, г)

Запишем формулу для квадрата модуля комплексного множителя $F^2(\psi)$ или для бистатической индикатрисы рассеяния $R(\psi)$ решетки:

$$F^2(\psi) = R(\psi) = 4 \sin^2 \frac{\psi}{2}. \quad (21)$$

Окончательно получаем выражение для $R(\theta)$:

$$R(\theta) = 4 \sin^2 \left\{ \frac{\pi \lambda}{d} (\sin \theta_p - \sin \theta_n) \right\}. \quad (22)$$

Анализ полученного соотношения (22) позволяет сделать следующие выводы:

— при углах рассеивания θ_p , которые равняются углам падения ЭМВ, т. е. при $\theta_p = \theta_n$, двухэлементная ААР (при $\rho_{12}=1$) не переизлучает сигналы;

— отражательные свойства ААР при $\theta_p = \theta_n$ могут использоваться с целью противорадиолокационной маскировки от обнаружения ее моностатическими радарами;

— при условии $\theta_p = \theta_n$ маскирующие свойства ААР сохраняются в любом диапазоне ЭМВ. Ограничивающим фактором в этом случае можно считать относительную узкополосность КАКАШП;

— форма диаграммы рассеяния ААР, а также $\sigma_{\Sigma}(\theta)$, $R(\theta)$ существенно зависят от угла падения ЭМВ на апертуру ААР.

Указанный способ уменьшения мощности отраженных сигналов практически реализован в устройстве, которое имеет два идентичных канала (основной и вспомогательный) с идентичными антеннами. Каждый канал обработки сигналов от антенны до соответствующего входа автокомпенсатора представляет собой обычный супергетеродинный приемник, включающий в себя усилитель высокой частоты, преобразователь частоты (который, в свою очередь, состоит из смесителя и гетеродина) и усилитель промежуточ-

ной частоты. Гетеродин является общим для обоих каналов.

Автокомпенсатор может быть выполнен по типу квадратурного корреляционного автокомпенсатора или по типу гетеродинного автокомпенсатора.

Для того чтобы перевести корреляционный автокомпенсатор из режима подавления активных или пассивных помех в режим искажения информации о радиолокационных характеристиках объектов, необходимо обеспечить его максимальное быстродействие. Постоянная времени автокомпенсатора должна примерно в три раза превосходить время задержки в цепи корреляционной обратной связи, что достаточно легко решается — известно, что автокомпенсатор активных шумовых помех имеет постоянную времени, равную трем периодам повторения локатора, а автокомпенсатор пассивных помех имеет постоянную времени, равную длительности трех зондирующих радиоимпульсов.

Результаты опытной проверки предложенного метода искажения информации о радиолокационных характеристиках объектов представлены на рис. 3. Отчетливо видны провалы в диаграмме рассеяния ААР, оснащенной КАКАШП.

Описанный способ искажения информации о радиолокационных характеристиках позволяет достаточно эффективно противодействовать определению дислокации объектов.

Используя современные средства радиоэлектронного и информационного обеспечения можно применять данный способ для противорадиолокационной маскировки любых объектов и техники.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Бененсон Л. С., Фельд Я. Н. Рассеяние электромагнитных волн антеннами (обзор) // Радиотехника и электроника. — 1988. — Т. XXXIII, № 2. — С. 225—246.
2. Захарьев Л. Н., Леманский А. А. Рассеяние волн «черными» телами. — Г.: Сов. радио, 1968.

Д. т. н. В. А. ВОРОНИН, к. т. н. С. К. ГУБА,
д. ф.-м. н. И. В. КУРИЛО

Украина, г. Львов, НУ «Львовская политехника»
E-mail: gubask@polynet.lviv.ua, kuryloiv@yahoo.com

Дата поступления в редакцию
19.05 2009 г. — 02.02 2010 г.

Оппонент к. т. н. В. И. БОСЫЙ
(НПП «Сатурн», г. Киев)

ПОЛУЧЕНИЕ АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВЫХ СТРУКТУР СИЛОВЫХ БИПОЛЯРНЫХ И ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ МЕТОДОМ ГАЗОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ

Исследована технология получения изотермическим низкотемпературным методом хлоридной эпитаксии совершенных структур GaAs, легированного Sn и Bi. На основе таких структур созданы силовые биполярные и полевые транзисторы с улучшенными характеристиками.

Прогресс в развитии силовых и СВЧ полупроводниковых приборов, в том числе силовых биполярных транзисторов (СБТ), полевых транзисторов с барьером Шоттки (ПТШ) и цифровых больших интегральных схем (БИС) на базе этих приборов, связан с использованием арсенида галлия [1]. Для практической реализации преимуществ этого материала необходимо решить комплекс задач по оптимизации конструктивных особенностей приборов с учетом технологических средств их изготовления, которые существенно отличаются от средств для приборов на базе кремния.

Наиболее универсальным и технологичным методом получения GaAs-структур является метод газофазной эпитаксии (ГФЭ) из металлоорганических соединений элементов третьей группы с гидридами мышьяка и фосфора. При этом методе получение однородных по толщине слоев и возможность контролировать состав не вызывает затруднений в отличие от метода ГФЭ в хлоридных или хлоридно-гидридных системах. Однако последний метод обеспечивает высокую степень чистоты слоев от углерода, которая соответствует высоким требованиям к концентрации остаточных неконтролируемых примесей, и поэтому является одним из перспективных для создания структур СБТ и ПТШ на основе арсенида галлия. Метод ГФЭ в хлоридной или в хлоридно-гидридной системах [2] обеспечивает возможность выращивания слоев на основе арсенида галлия микрометрической и субмикрометрической толщины, а также создание всей структуры СБТ типа $n^+-n-n^0-p-n^+$ и ПТШ типа $i-n^0-n-n^+$ в едином технологическом процессе.

БИС на основе полевых транзисторов Шоттки (изготовленных на базе структуры $i-n^0-n-n^+$) и СБТ (типа $n^+-n-n^0-p-n^+$) имеют нестабильные электрофизические параметры и низкую их воспроизводимость по поверхности пластины.

Эта нестабильность электрофизических параметров возникает за счет взаимной диффузии легирующих компонентов из n^0 -буферного слоя в активный n -слой, в результате которой вблизи границы раздела между n^0 - и n -слоем формируются дополнительные электронные уровни, распространяющиеся в активную область. Диффузия приводит к возникновению кратко- и долговременного дрейфа. Причиной низкой воспроизводимости параметров по площади выращенного активного эпитаксиального слоя является неравномерное распределение на самой подложке плотности дислокаций легирующих и неконтролируемых примесей.

В настоящей работе исследовалась возможность получения совершенных структур СБТ и ПТШ на базе арсенида галлия для БИС с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Силовой биполярный транзистор

Обычно такие приборы используются со слаболегированным коллектором, а метод газофазной эпитаксии обеспечивает возможность выращивания слоев n -типа с концентрацией электронов $10^{14}—10^{15} \text{ см}^{-3}$, а также создания всей структуры типа $n^+-n-n^0-p-n^+$ в едином технологическом процессе (рис. 1).

В транзисторе с высокоомным коллектором желательно обеспечить увеличение концентрации при-

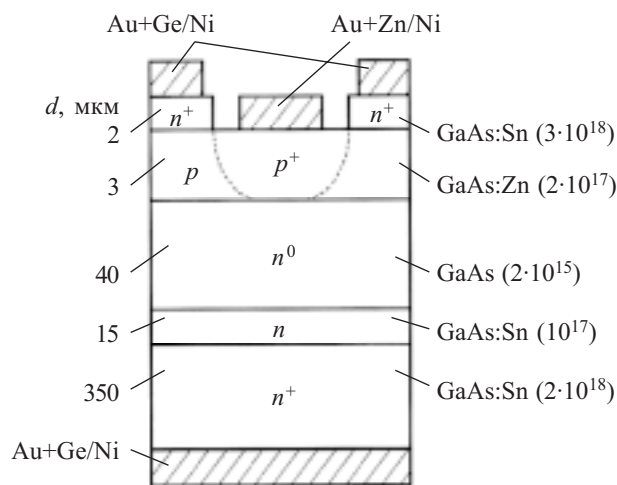


Рис. 1. Схема структуры транзистора с селективно выращенным эмиттером (в скобках указана концентрация носителей N в слое в см^{-3})

меси p -типа в базе до максимально возможного уровня. Это обусловлено, во-первых, необходимостью компенсировать эффект вытеснения эмиттерного тока при высокой его плотности, уменьшить размеры области объемного заряда, а во-вторых, необходимо уменьшить сопротивление пассивной части базы. Такие меры предотвратили бы прокол базы и дали бы возможность реализовать преимущества уменьшения размеров p -области для повышения быстродействия приборов и коэффициента передачи эмиттерного тока. Однако концентрация дырок в базе для транзисторов с гомо- p - n -переходами принципиально ограничена уровнем порядка $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, что определяется границей легирования эмиттера ($N_e = 5 \cdot 10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$).

Выращивание n^+ -пленок большой площади методом паровозной эпитаксии (ПФЭ) в хлоридных проточных системах, которые отвечают одновременно условиям предельного гомогенного легирования и однородного распределения примеси на поверхности подложки, требует решения многопараметрической задачи оптимизации процесса. Это связано, главным образом, с тем, что для достижения каждого из этих условий нужно применить конкурирующие технологические операции. Поэтому решалась комплексная задача создания высоковольтных биполярных транзисторов большой площади с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Было исследовано распределение концентрации носителей $N_e(x)$ вдоль подложки в зависимости от общей площади S подложек GaAs при легировании оловом до уровня $N_e = (3-4) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Структуру типа GaAs:Sn–GaAs:Zn получали методом ПФЭ в хлоридной системе GaAs–AsCl₃–H₂ в горизонтальном проточном многоканальном реакторе [3]. Использовались подложки типа АГЧПК-4-62, ориентированные в направлении [110] с отклонением на 3° от плоскости (100). Известно, что максимальная однородность слоев по толщине и уровню легирования в хлоридном методе ПФЭ достигается при реализации таких режимов роста, когда скорость кристаллизации основного соединения и скорость вхождения примеси ограничиваются кинетикой соответствующих процессов на поверхности подложки GaAs. Такие режимы при атмосферном давлении характеризуются высоким парциальным давлением основных и легирующих компонентов и относительно низкой температурой подложки (690–710°C) [4]. Известно, что эффективные константы распределения легирующих примесей в GaAs обычно являются функциями концентрации основных компонентов в газовой фазе (GaCl, As₄, HCl) и уменьшаются с ростом этих концентраций при снижении температуры выращивания [5].

Компенсировать эту зависимость увеличением парциального давления молекул примесей в большинстве случаев невозможно, поскольку, во-первых, процесс вхождения примесей Sn и Zn в кристаллическую решетку либо протекает с некоторыми диффузионными ограничениями массопереноса [5], либо ограничен низкой растворимостью в твердой фазе. Из этого следуют или пространственная неоднородность N_e , или недостаточный уровень легирования

эмиттера. Во-вторых, высокая концентрация примесей в атмосфере реактора отрицательно влияет на фоновые концентрации носителей заряда в слаболегированном коллекторе и может привести к локальному формированию пересыщенного твердого раствора в n^+ -слое и к его распаду с образованием новой фазы в матрице GaAs.

В качестве легирующей примеси n -типа в эмиттерах транзисторов на основе GaAs используют Sn. Этот элемент позволяет получать концентрацию свободных электронов на уровне $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в n^+ -слоях достаточно совершенной структуры GaAs, выращенной методом ПФЭ в хлоридной системе. Такое легирование способствует увеличению скорости роста структуры. Высокую концентрацию электронов можно получить при температуре подложки выше 720°C, когда процесс эпитаксии в значительной степени лимитируется диффузией компонентов в паровой фазе. Таким образом, технологический режим ограничен рядом внешних параметров. Чтобы получить однородную по координате x скорость роста структуры $V(x)$, для выбранных значений концентрации основных компонентов в системе, температуры роста, геометрии реактора и площади используемых подложек S необходимо задать изменение температуры вдоль подложки $T(x)$. Ось x берет свое начало у торца первой подложки (начало зоны роста) и направлена вдоль прямого горизонтального реактора по ходу газового потока.

На рис. 2 показан характер распределения электронов вдоль подложки в слоях арсенида галлия, легированного оловом, при различной эффективной (покрытой выращенным слоем) площади подложки.

Абсолютную величину парциального давления трихлорида мышьяка, который подается в область источника олова (10^{-1} мм рт. ст.), выбирали такой, чтобы концентрация электронов в n^+ -слое (см. рис. 1) в начале зоны роста составляла $(3-4) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (рис. 2). Высокие значения относительной неоднородности легирования $\Delta N_e / N_e$ вызываются следующими причинами.

Рост структуры GaAs происходит в диффузионно-кинетической области режима, в то же время про-

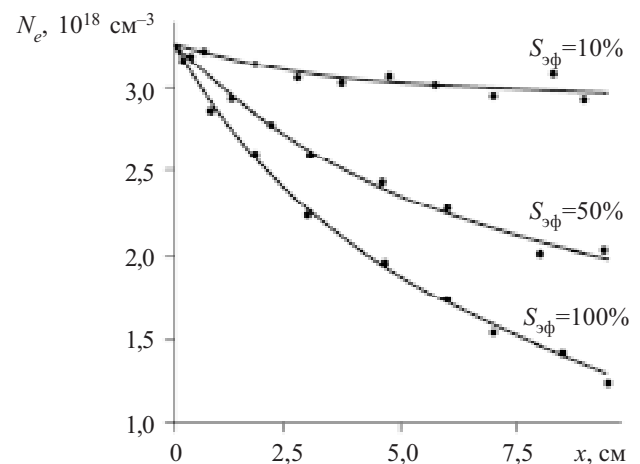


Рис. 2. Зависимость распределения концентрации электронов в пленке GaAs вдоль подложки при различной эффективной площади подложки

цесс легирования является практически равновесным (т. е. проходит намного быстрее) [5]. Уменьшение активности легирующей примеси (олова) приводит к более однородному легированию.

С увеличением координаты x рост парциального давления хлористого водорода в ниспадающем температурном поле приводит к дополнительному уменьшению активности олова α_{Sn} в GaAs. Поэтому повышение однородности скорости роста пленки за счет увеличения отрицательного градиента температуры $\Delta T(x)$ над зоной роста приводит, при прочих равных технологических условиях, к более резкой координатной зависимости концентрации электронов в пленке. В то же время, уменьшение отрицательного градиента температуры $\Delta T(x)$ приводит к некоторому уменьшению наклона кривой $N_e(x)$, но при этом величина изменения скорости роста слоя арсенида галлия, легированного оловом, вдоль подложки возрастает.

Таким образом существует оптимальное значение градиента температуры при фиксированной эффективной площади подложек. Уменьшение эффективной площади подложек вызывает сдвиг оптимального значения и приводит к улучшению распределения электронов (изменению наклона кривой $N_e(x)$ на рис. 2) и однородности скорости роста слоя вдоль подложки.

Известно, что при одинаковом уровне легирования удельное сопротивление пассивных областей базы в структурах GaAs в несколько раз выше, чем в кремниевых аналоговых приборах. Кроме того, в технологической операции создания приконтактного слоя обычно используют базовые слои с концентрацией акцепторов около 10^{19} см^{-3} . Для снижения сопротивления неактивной части базы до единиц Ом в зону, которая находится под контактом базы транзистора (область p^+ на рис. 1), проводили диффузию Zn на глубину 2—3 мкм до уровня $N_p = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ с поверхностной концентрацией около 10^{20} см^{-3} .

В начале повторной эпитаксии возможно образование границы с повышенной плотностью дефектов и, соответственно, скоростью рекомбинации инжектированных неравновесных электронов. Чтобы избежать этого, в процессе селективного наращивания после обычного газового травления p -базы на общую глубину 0,5 мкм предварительно осаждали слой p -типа с параметрами, эквивалентными параметрам базы, а затем формировали эмиттер толщиной около 2 мкм. Такая последовательность операций обеспечивает пространственное разделение границы между металлом и p - n -переходом «эмиттер—база».

Для создания силового варианта транзистора необходимо дополнительно провести операции формирования силовых контактов и напаивания структуры на термокомпенсатор для защиты p - n -переходов и расположения ее в корпусе.

Полевой транзистор

Как уже было отмечено, БИС на основе полевых транзисторов Шоттки, изготовленных на базе структуры i - n^0 - n - n^+ (рис. 3), имеют нестабильные электрофизические параметры, низкую их воспроизводимость по поверхности пластины.

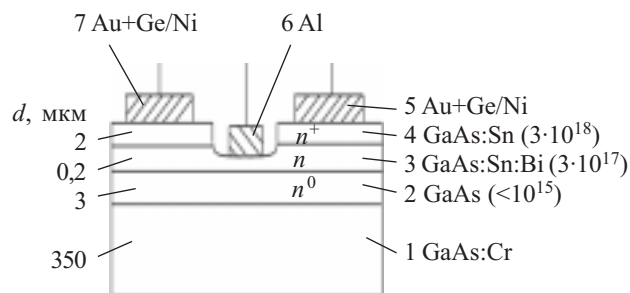


Рис. 3. Схема полевого транзистора с барьером Шоттки (в скобках указана концентрация электронов в слое в см^{-3}): 1 — подложка типа АГЧПХ; 2 — буферный n^0 -слой; 3 — активный n -слой; 4 — приконтактный n^+ -слой; 5 — сток; 6 — затвор; 7 — источник

Авторами [6] были проанализированы возможные механизмы снижения плотности дислокаций в активном n -слое. Показано, что для создания 3—4-слойных структур необходимо учитывать тип и концентрацию легирующей примеси в подложке и слое, количество слоев и последовательность их расположения в структуре. Кроме того, известно, что широко применяемые подложки типа АГЧПХ отличаются высокой неоднородностью от центра к периферии коррелирующих между собой плотности дислокаций и неконтролируемых примесей. Во время наращивания активных слоев полевых транзисторов Шоттки на поверхности подложки происходит неравномерное прорастание дислокаций и диффузия неконтролируемых примесей из площади подложки в активную область ПТШ. Это приводит к пространственному изменению характеристик ПТШ, полученных на этой подложке. Для снижения отрицательного влияния подложки используют буферные слои, тип и параметры которых определяют величину подвижности электронов и уровень их компенсации в активном слое, а в конечном случае — крутизну вольт-амперной характеристики, шумовые и частотные характеристики ПТШ и их стабильность [2].

Основной задачей при эпитаксиальном выращивании является снижение температуры и обеспечение изотермического режима роста соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ [7, 8]. Это связано с тем, что снижение температуры эпитаксии приводит к уменьшению микронеоднородности наращиваемого слоя вследствие уменьшения диффузии примесей и концентрации собственных точечных дефектов, для которых дислокации являются эффективным геттером.

Для создания n^0 -буферного слоя был использован разработанный низкотемпературный метод роста [9], позволяющий в одном технологическом цикле прямооточного горизонтального реактора наращивать слой n^0 -типа из чистого GaAs толщиной 2—3 мкм. Наибольшая неоднородность скорости роста n^0 -слоя наблюдается на первых 1,5—2 см зоны осаждения GaAs в подсистеме $\text{GaAs}-\text{AsCl}_3-\text{H}_2$ (рис. 4). В этой области происходит встраивание в n^0 -слой неконтролируемых примесей, которые попадают в газовую фазу из твердого источника GaAs. При этом основной неконтролируемой примесью, которая попадает в

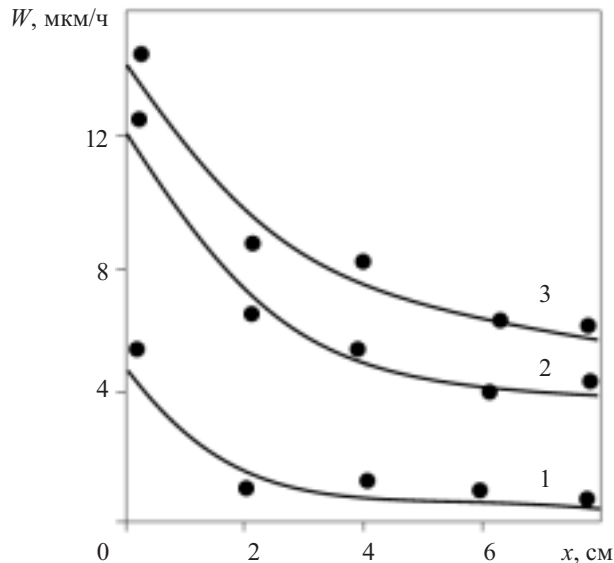


Рис. 4. Изменение скорости роста W слоя GaAs вдоль подложки при разном составе газовой фазы в реакторе, а именно при различной суммарной концентрации хлоридов α_{Cl} (в %):
1 — 0,1; 2 — 0,55; 3 — 0,9

активный n -слой (GaAs:Sn) из паровой фазы, является кремний.

В [10] показано, что в объемных кристаллах GaAs и GaP обнаружено снижение концентрации неконтролируемой примеси кремния вследствие изоэлектронного легирования. Причем, степень уменьшения концентрации Si в GaAs зависит от того, какой из изovalентных примесей будет легирован GaAs. Концентрация Si последовательно убывает при легировании примесями Sb–In–Bi. В связи с этим в [11] авторы исследовали формирование газовой фазы в системе GaAs–Bi–AsCl₃–HCl–H₂–He с целью получения источника роста Bi в GaAs в виде BiCl₃ при низких температурах роста (670–720°C). Было показано, что в подсистеме Bi–AsCl₃–He при взаимодействии Bi с AsCl₃ в атмосфере He насыщение BiCl₃ достигается при температуре 600–620°C, а в подсистеме Bi–HCl–H₂ насыщение BiCl₃ достигается при температуре 800–830°C. Это позволяет утверждать, что подсистемы Bi–AsCl₃–He и GaAs–AsCl₃–H₂ системы GaAs–Bi–AsCl₃–HCl–H₂–He могут быть использованы каждая отдельно в одном из каналов многоканального реактора, описанного в [12], для формирования паровой фазы при низкотемпературном изотермическом росте GaAs, легированного Bi.

Для получения активного n -слоя структуры ПТШ оптимизировали температурный режим роста и состав газовой фазы в системе GaAs–Bi–AsCl₃–HCl–H₂–He. Минимальный разброс (порядка 2%) по толщине тонких слоев, легированных оловом и висмутом, наблюдается в узком интервале концентрации $5 \cdot 10^{-4}$ – 10^{-3} мольных долей AsCl₃ при фиксированной температуре роста 700°C. Максимальную однородность получаемых пленок GaAs:Sn:Bi можно объяснить тем, что при указанном режиме роста скорость встраивания атомных компонентов в структуру наращиваемо-

го слоя становится соизмеримой со скоростью их массопереноса. Для выравнивания степени легирования активного слоя оловом был использован дополнительный, по сравнению с [12], канал введения HCl–H₂ в зону роста при небольшом отрицательном градиенте температуры подложки $\Delta T/x = -2^\circ\text{C}/\text{см}$. Кроме того, через еще один канал в зону роста подавался BiCl₃–He, который дополнительно легировал GaAs изovalентной примесью Bi. Поскольку коэффициенты распределения олова и висмута между газовой фазой и арсенидом галлия пропорциональны концентрации HCl, вследствие трехкратного уменьшения скорости роста в точке $x=0$ (передний торец подложки) и одновременного увеличения HCl в паровой фазе уменьшается скорость обеднения SnCl₂ и BiCl₃ приблизительно в четыре раза при постоянной температуре роста. Это позволило получить воспроизводимые и однородные по толщине и степени легирования активные n -слои с подвижностью носителей $4300 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при температуре 22°C и концентрацией носителей заряда $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Параметры подконтактного слоя не обязательно должны удовлетворять высокой однородности легирования в плоскости структуры, поскольку при уменьшении контактного сопротивления до $(1-5) \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ последующее снижение сопротивления стока и истока перестает быть определяющим на фоне сопротивления пассивной области канала ПТШ. Для получения необходимого контактного сопротивления между n^+ -приконтактным слоем и омическим контактом на базе Au+Ge/Ni достаточно достичь концентрации олова в арсениде галлия порядка 10^{18} см^{-2} . Для осаждения подконтактного слоя с такой концентрацией электронов концентрация AsCl₃, подведенного к источнику олова, была увеличена до $2,3 \cdot 10^{-2}$ мольной доли, что позволило обеспечить необходимые параметры. Полученные эпитаксиальные структуры на подложках диаметром 40 мм были использованы для создания маломощных ПТШ с длиной затвора 1,5 мкм и расстоянием «сток–исток» 5 мкм на полезной площади $30 \times 40 \text{ мм}$. Напряжение на затворе транзистора, при

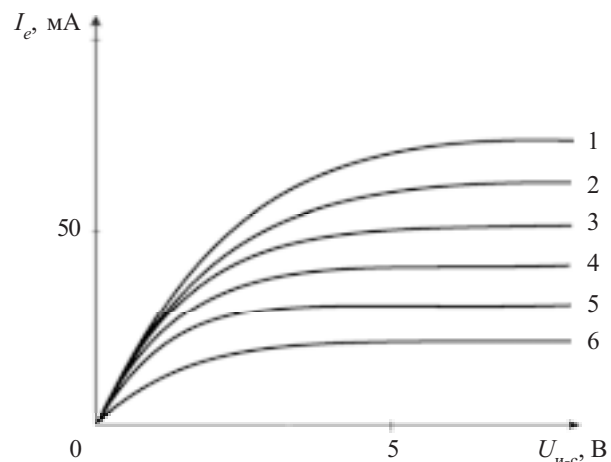


Рис. 5. Выходные ВАХ полевого транзистора с барьером Шоттки на базе GaAs в схеме с общим истоком при разном значении $U_{и-с}$ (в В):
1 — 0; 2 — -1; 3 — -2; 4 — -3; 5 — -4; 6 — -5 [13]

котором происходило полное перекрытие канала, определяется напряжением «затвор—исток» $U_{з-и} = 4$ В. Крутизну характеристик ПТШ измеряли при напряжении «сток—исток» $U_{с-и} = 2$ В. На рис. 5 показаны ВАХ для совокупности таких транзисторов.

Значение крутизны ВАХ ПТШ, полученных в одном технологическом цикле в системе GaAs—Bi—AsCl₃—HCl—H₂—He, находилось в интервале 20—21 мА/В, а разброс их величины не превышал 3—5%.

Разброс параметров приборов в пределах одной подложки не коррелирует с координатой подложки в реакторе в процессе роста, а определяется дислокационной неоднородностью структуры и ее электрофизическими характеристиками, а также различными эффектами топологии.

Заключение

Таким образом, показана принципиальная возможность создания планарных слоев структур биполярных транзисторов типа n^+-n^0-p и планарных слоев структур типа $i-n^0-n^+$ полевых транзисторов с барьером Шоттки на базе GaAs в хлоридных или хлоридно-гидридных системах.

Для получения таких структур были решены комплексные технологические задачи, определены режимы роста слоев GaAs. Достигнутая неоднородность по толщине не превышает 3%, а по уровню легирования — 5%. Это позволило получить улучшенные эксплуатационные характеристики СБТ и ПТШ на базе GaAs.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Уисмен У., Френсли У., Уестфел Дж. и др. Арсенид галлия в микроэлектронике.— М.: Мир, 1988.
2. Ди Лоренцо Д. В., Канделоула Д. Д. Полевые транзисторы на арсениде галлия. Принципы работы и технология изготовления.— М.: Радио и связь, 1988.

3. Guba S. K. Producing of power GaAs bipolar transistor in the GaAs—AsCl₃—H₂ system // Functional materials.— 1999.— Vol. 6, N 4.— P. 702—705.

4. Guba S. K. Preparation of uniform - structured field effect transistors with Shottky barrier by low-temperature chloride epitaxy method // Functional materials.— 1998.— Vol. 5, N 1.— P. 127—129.

5. Дьяконов Л. И., Ивлев В. Н., Липатова Н. И. и др. Особенности газового легирования оловом эпитаксиальных слоев арсенида галлия в системе Ga—AsCl₃—H₂ // Изв. АН СССР. Неорганические материалы.— 1986.— Т. 22, № 3.— С. 360—362.

6. Guba S. K., Kurilo I. V. Some features of defect formation in transition regions of multilayer GaAs homoepitaxial structures // Functional materials.— 2000.— Vol. 7, N 4 (2).— P. 815—818.

7. Гудз Э. С., Лукашин Г. А., Марончук И. Е. и др. Выращивание эпитаксиальных слоев в системе Ga—AsCl₃—H₂ при пониженной температуре // Изв. АН СССР. Неорганические материалы.— 1977.— Т. 13, № 19.— С. 1706—1710.

8. Губа С. К. Низкотемпературный изотермический метод хлоридной эпитаксии In_{1-x}Ga_xAs // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 1998.— № 2.— С. 40—42.

9. Пат. 18621 України. Спосіб одержання структур GaAs для інтегральних схем на основі польових транзисторів Шоттки / В. О. Воронін, С. К. Губа, Л. С. Плахотна.— 25.12.1997.

10. Ганина Н. В., Уфимцев В. Б., Фистуль К. И. Очистка арсенида галлия изовалентным легированием // Письма в ЖТФ.— 1982.— Т. 8.— С. 620—623.

11. Guba S. K., Kurilo I. V. Gas-phase formation at the low-temperature isothermal growing of Bi - doped GaAs layers // Functional Materials.— 2001.— Vol. 8, N 2.— P. 234—239.

12. Seki H., Koukitu A. New vapor growth method for III-V compound semiconductors using a single flat temperature zone // J. Semicond. Technol.— 1986.— Vol. 19, N 81.— P. 225—229.

13. Voronin V. O., Guba S. K., Kurylo I. V. Production of GaAs transistors with the Schottky barrier in Bi—GaAs—AsCl₃—HCl—SnCl₂—H₂—He system by epitaxial deposition // Journ. Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics.— 2006.— Vol. 9, N 4.— P. 48—53.

НОВЫЕ КНИГИ

Пономарев В. Ф. Дискретная математика для инженеров.— М.: Горячая линия — Телеком, 2009.— 320 с.

Дискретная математика нашла широкое применение в исследованиях больших систем и проектировании дискретных устройств автоматики, в защите и передаче информации, в управлении организационно-экономическими системами, в математической лингвистике и языках программирования. В книге изложены основы теории множеств и отношений, общей и булевой алгебры, комбинаторики и математической логики, теории графов, алгоритмов и автоматов. Основные разделы изложены для «четких» и «нечетких» множеств и отношений. В каждом разделе приводятся многочисленные примеры.

Книга сопровождается вычислительными алгоритмами по всем разделам и будет полезна инженерам различных специальностей при проектировании и управлении технологическими процессами и их информационном обеспечении. Особый интерес она представляет для студентов университетов при изучении таких разделов дискретной математики, как «теория графов», «математическая логика», «теория алгоритмов» и «теория автоматов».



Д. т. н. Э. С. МАЛКИН, д. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО,
М. И. ДЬЯЧКОВ, Т. Ю. НИКОЛАЕНКО

Украина, г. Киев, КНУ строительства и архитектуры,
Министерство промышленной политики Украины,
КНУ им. Тараса Шевченко
E-mail: nikola@industry.gov.ua

Дата поступления в редакцию
14.01.2010 г.

Оппонент д. т. н. В. Т. ДЕЙНЕГА
(НИИ «Шторм», г. Одесса)

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЩЕЛЕВОГО ТЕПЛООБМЕННИКА С РАЗВИТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ТЕПЛООБМЕНА

Предложена конструкция водяного многоканального щелевого теплообменника, позволяющего отводить мощность до 750 Вт при температуре имитатора теплового потока 60°C, а также пути повышения технологичности изготовления теплообменника.

За последние десятилетия элементная база электронной аппаратуры существенным образом обновилась — вместо маломощных интегральных микросхем появились мощные полупроводниковые элементы, такие как одно- и многоядерные микропроцессоры, многокристальные модули, лазерные диоды, линейки и матрицы на их основе и т. п. Мощности микропроцессоров с повышением тактовой частоты постоянно возрастает [1] и уже достигла 130 Вт [2, 3]. Мировая тенденция к постоянному увеличению количества транзисторов на кристалле (1720 млн., 2006 г., микропроцессор Intel Itanium IA-64 Montecito [3, с. 58]) и стремление к уменьшению размеров электронных компонентов обуславливают дальнейший рост их удельного тепловыделения до 100 Вт/см² [4, с. 331—334], а в будущем ожидается его увеличение до 200 Вт/см² [5], что вызывает острую необходимость повышения эффективности охлаждения микропроцессоров. Создание микропроцессора «Pentium-5» оказалось труднейшей задачей именно из-за сложности решения проблемы его охлаждения [6].

С целью повышения эффективности охлаждения микропроцессоров в последнее время разработаны водяные системы охлаждения на основе теплообменников со щелевыми каналами [7—10]. В [10] показано, что благодаря высокому коэффициенту теплоотдачи в щелевых каналах использование алюминиевого двухканального щелевого теплообменника с высотой каждого канала 0,3 мм вместо штатного медного водяного теплообменника в составе замкнутой водяной системы охлаждения Titan модели TWC-A05 позволяет при одинаковой температуре имитатора теплового потока (плюс 60°C) отвести на 60 Вт больше — 172 против 112 Вт. Использование же разработанного щелевого теплообменника вместо теплообменника Titan в разомкнутой системе водяного охлаждения с температурой воды на входе 14°C позволяет при температуре имитатора плюс 60°C повысить отводимую мощность с 234 до 307 Вт.

Вместе с тем, дальнейшее повышение отводимого теплового потока с помощью такого теплообменника сдерживается ограниченностью поверхности теплообмена в щелевых каналах, параллельных основанию теплообменника, что не позволяет использовать его для охлаждения более мощной элементной базы перспективной электронной аппаратуры, в т. ч. и более мощных микропроцессоров.

Целью настоящей работы является разработка и экспериментальное исследование тепловых и гидравлических характеристик более эффективной конструкции щелевого теплообменника.

Разработанный теплообменник имеет развитую поверхность теплообмена и представляет собой медный теплообменный блок размерами 45×31×18 мм с щелевыми каналами шириной 0,2 мм и высотой 8 мм, плотно вставленный в окно основания полого медного корпуса теплообменника размерами 55×55×20 мм и запаянный в нем по периметру заподлицо с нижней поверхностью основания. Теплообменный блок размещается так, чтобы щелевые каналы были перпендикулярны основанию теплообменника. Нижняя поверхность собранного таким образом теплообменника дополнительно обрабатывалась механически и отполировывалась для создания гладкой контактной поверхности.

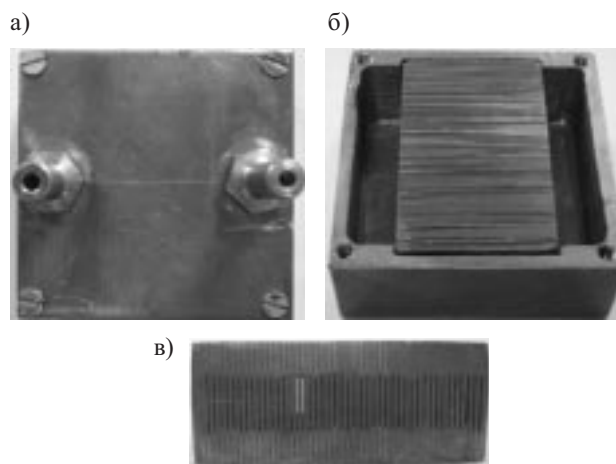


Рис. 1. Внешний вид многоканального щелевого теплообменника (а), вид сверху со снятой крышкой (б) и вид на теплообменный блок со стороны открытых торцов щелевых каналов (в)

Теплообменный блок со щелевыми каналами образован путем набора пакета из 42-х медных пластин размером 18×31 мм, толщиной 1 мм, разделенных между собой сверху и снизу медными прокладками размером 5×31 мм, толщиной 0,2 мм. Пакет пластин с прокладками был плотно стянут и скреплен шестью медными стержнями с расклепанными концами, предварительно вставленными в просверленные в пакете сквозные отверстия.

Схема исследуемого теплообменника приведена в [11], а его внешний вид в собранном и разобранном виде — на рис. 1. Между входными и выходными торцами щелевых каналов и соответствующими стенками корпуса теплообменника образованы входной и выходной коллекторы, сообщающиеся соответственно с входным и выходным патрубками.

Экспериментальная установка и методика проведения исследований

Экспериментальные исследования разработанного щелевого теплообменника проводились по разомкнутой схеме водяного охлаждения, описанной в [10]. Рабочим участком экспериментальной установки служил исследуемый многоканальный водяной теплообменник, закрепленный через слой тонкой алюминиевой фольги на имитаторе теплового потока с помощью четырех металлических шпилек М6 с гайками. В качестве имитатора теплового потока использовали электрический нагреватель, представляющий собой медный стержень диаметром 65 мм длиной 180 мм с отполированной контактной торцевой поверхностью и с намотанной на его боковую поверхность через слой электроизоляции нихромовой спиралью из проволоки диаметром 1,0 мм с электрическим сопротивлением 14,8 Ом. Нагреватель обеспечивал подвод к основанию теплообменника электрической мощности до 3270 Вт. Подключение нагревателя к питающей сети 220 В осуществлялось последовательно через регулятор напряжения типа РНО-2,5, что обеспечивало возможность регулирования мощности нагревателя в широких пределах. Значения питающего напряжения и тока определялись по показаниям вольтметра типа АСТВ класса точности 0,5 и амперметра типа Е59 класса точности 0,5.

Температура поверхности имитатора теплового потока в зоне контакта и температуры нижнего основания щелевого теплообменника измерялась с помощью хромель-копелевых термоэлектрических преобразователей (термопар) с диаметром проводов 0,2 мм, зачеканенных в пазах на соответствующих контактирующих поверхностях. На имитаторе теплового потока было установлено 5 термопар, на водяном теплообменнике — 8 (6 — на нижнем основании и 2 — на верхнем). Термо-эдс термопар измерялась с помощью цифрового милливольтметра типа Ф283.

Температура охлаждающей воды на входе в теплообменник и выходе из него измерялась с помощью ртутных термометров с ценой деления 0,1°C, помещенных в специально предусмотренные вставки в водяной магистрали. Объемный расход воды определялся с помощью мерного сосуда и секундомера.

Для измерения потерь гидравлического давления при прохождении водяного потока через теплообмен-

ник на входе водяной магистрали в теплообменник и выходе устанавливались вертикальные пьезометрические трубки с нанесенными миллиметровыми делениями.

Методика исследования тепловых и гидравлических характеристик предусматривала получение экспериментальных зависимостей среднего значения температуры имитатора теплового потока и среднего значения температуры нижнего основания теплообменника от величины отводимого теплового потока, которая определялась калориметрическим методом по перепаду температуры воды на выходе и входе теплообменника и ее массовому расходу через теплообменник. По разности температур нагревателя и теплообменника определялся перепад температуры в зоне контакта.

Результаты исследований и их анализ

Основная тепловая характеристика разработанного теплообменника, приведенная на рис. 2, получена при расходе охлаждающей воды через теплообменник 11,8 мл/с и температуре воды на входе 19°C. Из рисунка видно, что при температуре основания охлаждаемого микропроцессора, например, 65°C, с помощью такого теплообменника от микропроцессора можно отвести мощность до 900 Вт. Отсюда также можно определить, что при рекомендуемой для более надежной работы микропроцессора температуре 60°C его мощность рассеяния не должна превышать 750 Вт.

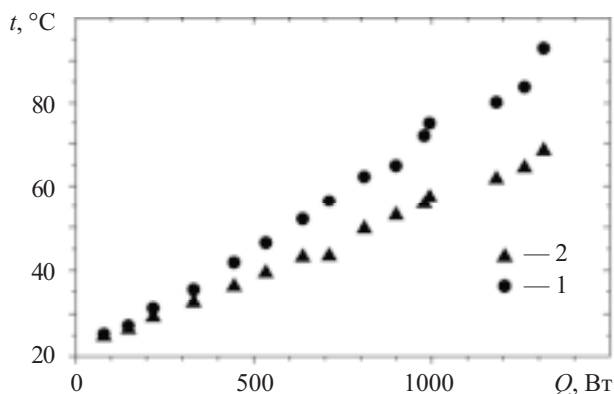


Рис. 2. Зависимость температуры t имитатора теплового потока в зоне контакта (1) и температуры основания многоканального щелевого теплообменника (2) от отводимого теплового потока Q

Использование данного теплообменника для охлаждения электронных компонентов на основе арсенида галлия, карбида кремния, алмаза и т. п., работоспособных при более высоких температурах, позволяет обеспечить более высокие значения отводимой мощности, вплоть до 1300 Вт. При этом температура основания охлаждаемого электронного компонента при расходе охлаждающей воды 11,8 мл/с не превышает 90°C.

Рис. 2 показывает также, насколько важной при отводе высоких мощностей является величина контактного термического сопротивления между охлаждаемым электронным компонентом и теплообменником.

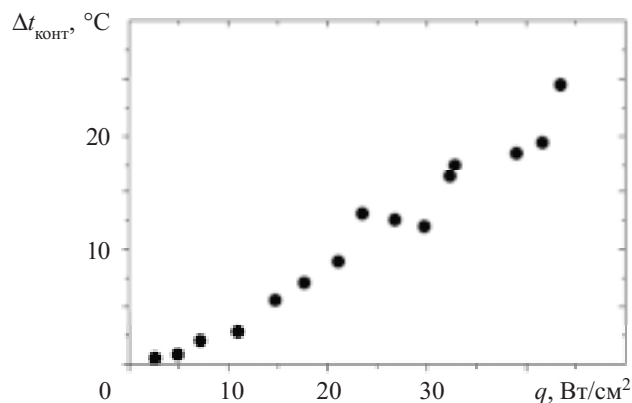


Рис. 3. Зависимость перепада температуры $\Delta t_{\text{конт}}$ между имитатором теплового потока и теплообменником в зоне контакта от плотности отводимого теплового потока q

Так, например, при отводимой мощности 1300 Вт перепад температуры в зоне контакта имитатора теплового потока с теплообменником достигает 25°C . Если бы удалось обеспечить близкий к идеальному тепловой контакт между ними (например, с помощью пайки серебросодержащим припоем), то за счет этого можно было бы снизить температуру имитатора в зоне контакта примерно на 20°C , что является достаточно существенным для современной элементной базы.

Рис. 3 наглядно показывает влияние уровня отводимого теплового потока, отнесенного к площади контактной поверхности теплообменника, составляющей $30,25 \text{ см}^2$, на перепад температуры в зоне контакта — можно сказать, эта зависимость близка к линейной. Попытки уменьшить контактное термическое сопротивление путем замены алюминиевой фольги пастой КПТ-8 ощутимого положительного эффекта не дали.

Дальнейшего увеличения отводимого теплового потока можно достичь, увеличив расход охлаждающей воды через теплообменник. Как видно из **рис. 4**, увеличение расхода воды с 11,8 до 16,3 мл/с позволяет повысить отводимую мощность с 1580 до 1988 Вт. Однако с увеличением отводимой мощности возрастают и средние значения температуры имитатора теплового потока, и температуры основания теплообменника — с $92,4$ до $121,4^\circ\text{C}$ и с $76,4$ до $91,6^\circ\text{C}$, соот-

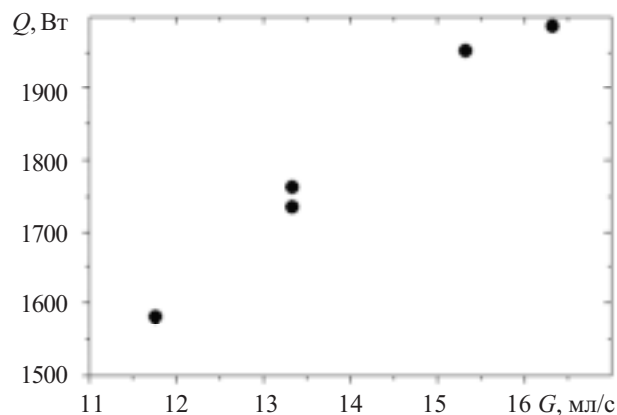


Рис. 4. Зависимость отводимого теплового потока Q от расхода охлаждающей воды G

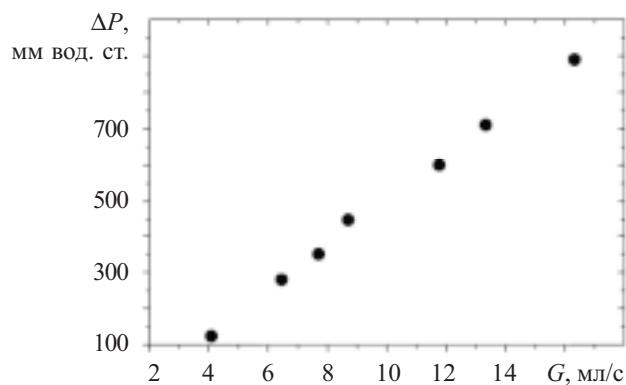


Рис. 5. Зависимость гидравлических потерь ΔP в теплообменнике от расхода охлаждающей воды G

ветственно. Кроме того, с увеличением расхода воды растут и гидравлические потери в теплообменнике (**рис. 5**), что необходимо учитывать при выборе насоса водяной системы охлаждения.

Проведенные исследования показали, что по сравнению с разработанным ранее двухканальным щелевым теплообменником [10] предлагаемый многоканальный щелевой теплообменник позволяет более чем в два раза (с 307 до 750 Вт) увеличить отводимую мощность в разомкнутой системе охлаждения при температуре имитатора теплового потока 60°C . Также на 200 мм вод. ст. (с 800 до 600 мм) снижаются гидравлические потери при одновременном увеличении почти вдвое (с 6,25 до 11,8 мл/с) расхода охлаждающей воды.

Вместе с тем, более глубокие сравнительные исследования указанных теплообменников свидетельствуют о несовершенстве разработанной конструкции многоканального теплообменника. Действительно, поверхность теплообмена разработанного многоканального щелевого теплообменника составляет 208 см^2 (41 канал сечением $0,2 \times 8 \text{ мм}$ и длиной 31 мм), в то время как у двухканального щелевого теплообменника — всего 13 см^2 (2 канала сечением $0,3 \times 20 \text{ мм}$ и длиной 13,6 мм). Полученное экспериментально увеличение отводимой мощности в многоканальном теплообменнике (в 2,4 раза) не адекватно увеличению теплоотдающей поверхности щелевых каналов (в 16 раз). Кроме того, габаритные размеры (без учета высоты патрубков) многоканального теплообменника ($55 \times 55 \times 20 \text{ мм}$) превышают габаритные размеры ($40 \times 40 \times 15,6 \text{ мм}$) двухканального.

В то же время, анализ конструкции исследуемого многоканального щелевого теплообменника показал, что потенциальные возможности данного технического решения в части отвода тепла не могли быть полностью реализованы в рассмотренной конструкции теплообменника по следующим причинам.

1) Высокие (18 мм) тонкие (1 мм) ребра-пластины, из которых набран пакет теплообменного (ТО) блока, имеют низкую эффективность.

2) Теплоноситель в каналах не имеет непосредственного контакта с теплоподводящей поверхностью, поскольку в ТО-блоке имеются сплошные части толщиной 5 мм для отверстий под стягивающие бол-

ты. При высокой плотности подводимого теплового потока (до 66 Вт/см²) это приводит к дополнительно термическому сопротивлению и, соответственно, перепаду температуры между нагреваемым основанием теплообменника и охлаждающей водой.

3) Одна из двух сплошных частей ТО-блока толщиной 5 мм практически не участвует в подводе теплоты к теплообменной поверхности стенок каналов, поскольку не имеет теплового контакта с тепловыделяющим элементом.

Кроме того, исследованная конструкция многоканального теплообменника является нетехнологичной, а его производство дорогостоящим.

Усовершенствованное конструктивно-технологическое решение теплообменника

С целью более полной реализации потенциальных возможностей многоканального щелевого теплообменника разработана более компактная и более технологичная в производстве конструкция, в определенной мере лишенная некоторых из указанных выше недостатков [13]. Она предусматривает изготовление теплообменника из двух оребренных с одной стороны заготовок, выполненных из теплопроводного материала (алюминия или меди) и соединенных между собой по периметру с обеспечением надежного теплового контакта (сваркой, пайкой и т. п.). Зазоры между теплообменными поверхностями смежных ребер заготовок выполняют роль щелевых каналов в таком теплообменнике (рис. 6). Ребра могут иметь прямоугольное, треугольное или трапециевидальное сечение.

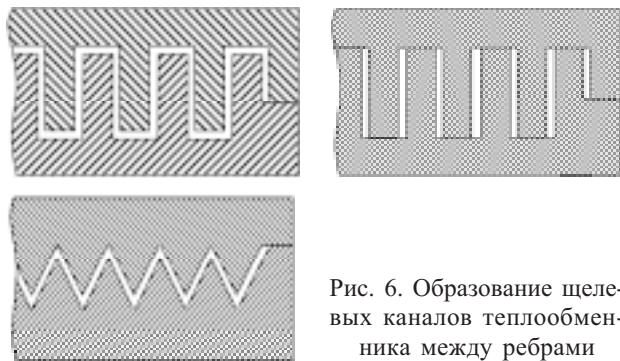


Рис. 6. Образование щелевых каналов теплообменника между ребрами

Такая конструкция позволяет изготавливать теплообменник из оребренных заготовок, легко получаемых методом экструзии. При этом качество теплообменной поверхности ребер может быть достаточно высоким, что положительно скажется на гидравлических характеристиках теплообменника.

Для обеспечения более надежного теплового контакта и лучшего подвода теплоты от нижнего основания к верхнему они могут быть соединены между собой с помощью миниатюрных тепловых труб, что несущественно увеличит габариты теплообменника, но повысит его теплоотводящую способность. Для подачи и отвода воды в теплообменнике предусмотрены соответствующие патрубки и коллекторы.

В дальнейшем планируется изготовление и исследование предложенного теплообменника.

Выводы

Таким образом, исследования показали, что разработанная конструкция водяного многоканального щелевого теплообменника позволяет по сравнению с известным двухканальным теплообменником увеличить более чем в два раза (с 307 до 750 Вт) отводимую мощность в разомкнутой системе охлаждения при температуре имитатора теплового потока 60°C. При этом данная конструкция теплообменника может быть усовершенствована и в части повышения эффективности отвода тепла, и в части повышения технологичности изготовления.

Разработанные теплообменники могут найти широкое применение не только для охлаждения микропроцессоров, но и для других теплонагруженных компонентов и узлов электронной аппаратуры.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Mahajan R., Chia-pin Chiu, Chryster G. Cooling a Microprocessor Chip // Proceedings of the IEEE.— 2006.— Vol. 94, N. 8.— P. 1476—1486.
2. Валентинова М. 64-бит процессоры дают плотно упакованные решения // Электроника: Наука. Технология. Бизнес.— 2004.— № 3.— С. 30—37.
3. Максимов Н. В., Партыка Т. Л., Попов И. И. Технические средства информатизации.— М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2008.
4. Фостер Л. Нанотехнологии. Наука, инновации и возможности.— М.: Техносфера, 2008.
5. Мельниченко А. Жидкостное охлаждение электронных компонентов // Электронные компоненты и системы.— 2005.— № 1.— С. 39—42.
6. Булат Л. П. Новое поколение твердотельных охладителей // Холодильная техника.— 2004.— № 8.— С. 2—7.
7. Патент України на корисну модель № 22628. Рідина система охолодження потужного електронного компонента / Е. С. Малкін, А. В. Тимошенко, Т. Ю. Ніколаєнко, Ю. Є. Ніколаєнко.— 2007.— Бюл. № 5.
8. Николаенко Ю. Е., Малкин Э. С., Фуртат И. Э., Николаенко Т. Ю. Экспериментальное исследование одноканального щелевого теплообменника жидкостной системы охлаждения для микропроцессора // Технологические системы.— 2007.— № 4.— С. 54—62.
9. Малкин Э. С., Тимошенко А. В., Николаенко Ю. Е., Николаенко Т. Ю. Повышение эффективности охлаждения процессоров // Труды 8-й МНПК «Современные информационные и электронные технологии».— Украина, Одесса.— 2007.— С. 265.
10. Малкин Э. С., Николаенко Ю. Е., Фуртат И. Э. и др. Сравнительные исследования двухканального щелевого теплообменника и существующего на рынке аналога // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2008.— № 3.— С. 50—54.
11. Малкин Э. С., Николаенко Ю. Е., Фуртат И. Э. и др. Аналитическое обоснование размеров высокоэффективных теплообменников с гребенчатыми щелевыми каналами // Труды 10-й МНПК «Современные информационные и электронные технологии». Том II.— Украина, Одесса.— 2009.— С. 81.
12. Патент України на корисну модель № 48048. Рідина система охолодження потужного електронного компонента / Е. С. Малкін, Ю. Є. Ніколаєнко, І. Е. Фуртат, М. І. Дячков.— 2009.— Бюл. № 12.
13. Заявка u2010 00477 від 19.01 2010 на видачу патенту України на корисну модель. Щілинний теплообмінник з розвинутою поверхнею теплообміну / Ю. Є. Ніколаєнко, Т. Ю. Ніколаєнко, Е. С. Малкін, В. Ф. Новіков.

К. т. н. Б. А. ДЕМЬЯНЧУК

Украина, Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова
E-mail: badem@rambler.ru

Дата поступления в редакцию
23.10 2009 г. — 23.05 2010 г.

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

МИКРОВОЛНОВАЯ ОБРАБОТКА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В НЕРЕЗОНАНСНЫХ СИСТЕМАХ

Обсуждаются принципы построения нерезонансных систем микроволновой обработки диэлектрической среды и результаты их экспериментальной реализации, при которой достигаются свойства систем, отличные от традиционных.

Преимуществами микроволновой обработки диэлектрических сред (связанной, прежде всего, с потерями электромагнитной энергии на преодоление взаимного притяжения их поляризованных молекул) перед другими способами обработки (например, нагревом) являются прямое объемное, экологически чистое воздействие, высокая интенсивность, гибкая управляемость процесса, независимость от дефицитных источников энергии [1]. Именно поэтому микроволновая обработка диэлектрических материалов в камерах различного назначения получила широкое распространение несмотря на некоторые недостатки, а именно [2, 3]:

— «стоячие» волны в объеме резонансной камеры вызывают локальные перегревы диэлектрических материалов в пучностях и недогревы в узлах стоячей волны;

— поверхностные токи в стенках резонансной камеры наводят в шлюзах камеры внешние излучения, что создает помехи для электронного оборудования;

— из-за взаимной расстройки резонансных частот камеры и генератора при малой загрузке камеры потери энергии в системе увеличиваются на десятки процентов;

— работа генератора на несогласованную нагрузку вызывает его перегрев из-за стоячих волн в питающем волноводе.

Актуальность совершенствования систем микроволновой обработки определяется, таким образом, нереализованностью потенциальных возможностей существующего способа воздействия электромагнитного поля на диэлектрическую среду в резонансной системе, востребованного в настоящее время.

Целью статьи является обсуждение физических основ процесса микроволновой обработки, которое направлено на совершенствование способа обработки диэлектрических материалов и на создание более совершенных микроволновых систем — нерезонансных, которые могут обеспечить более высокое качество обработки материалов, энергетическую эффек-

тивность, экологическую безопасность процесса микроволновой обработки.

В ходе настоящих исследований были сформулированы физико-технические принципы создания нерезонансных систем микроволновой обработки диэлектрических материалов. Их применение в совокупности позволяет обеспечивать равномерное электромагнитное поле в обрабатываемой среде, безопасный уровень излучений из камеры, независимость КПД системы от уровня загрузки камеры. Принципы, основанные в [4—6], впервые сформулированы в следующем виде.

◦ Резонансные свойства камеры микроволновой обработки целесообразно нейтрализовывать с помощью покрытия, наносимого на стенки камеры, преобразующего балластную энергию поля в тепловую.

◦ Электромагнитную энергию, вводимую в камеру, необходимо концентрировать в объеме обрабатываемого образца диэлектрического материала с помощью излучателя, имеющего такую диаграмму направленности, у которой размеры поперечного сечения в картинной плоскости соответствуют среднестатистическим размерам сечения обрабатываемых образцов.

◦ Продольный размер обрабатываемого образца диэлектрического материала должен быть согласован с глубиной проникновения поля в материал этого образца.

◦ Размеры камеры микроволновой обработки целесообразно согласовывать с соответствующими усредненными размерами обрабатываемых образцов.

◦ Электромагнитная балластная энергия, падающая на покрытие, преобразующее ее в тепловую, должна отводиться с помощью теплообменника и использоваться для интенсификации процесса обработки.

◦ Раскрыв излучателя должен быть удален от обрабатываемого образца на расстояние, большее чем расстояние до ближней границы дальней зоны излучения электромагнитных колебаний.

Для реализации преимуществ нерезонансной системы микроволновой обработки необходимо применение в ее конструкции трех дополнительных элементов: концентратора (излучателя) электромагнитной энергии, покрытия-преобразователя балластной энергии поля в тепловую и теплообменника.

Реализация покрытия-преобразователя балластной энергии поля в тепловую требует применения термостойких и влагостойких радиопоглощающих покрытий с малым коэффициентом отражения и коэффициентом прохождения типовых сред на уровне $-(5-10)$ дБ/мм [7].

Термостойкой основой для таких покрытий являются полимеры органической или неорганической природы (например, эпоксикремнийорганические смолы и каолиниты). В качестве наполнителя композитных материалов целесообразно применять ферриты на основе электропроводящих оксидов переходных металлов со структурой шпинели обращенного типа [8]. Именно эти наполнители позволяют обеспечить не только требуемый уровень электропроводности композитного преобразователя энергии, но и необходимую его суммарную намагниченность вследствие неполной компенсации антиферромагнитного упорядочения спиновых систем их элементарной молекулярной ячейки.

Прогнозирование ожидаемого значения коэффициента преобразования электромагнитной энергии в тепловую для покрытия с градиентом электромагнитных потерь поля существенно упрощает трудоемкую и малопроизводительную процедуру построения преобразователей с требуемыми свойствами [9]. Такая аналитическая оценка проводится по результатам предварительно измеренных значений коэффициентов отражения и прохождения каждого из слоев этого многослойного покрытия.

Модель нерезонансной системы для микроволновой обработки диэлектрических сред приведена на **рис. 1**. Новые узлы конструкции, вводимые в известную систему, здесь заштрихованы, а параметры в блоке логических переходов обозначают следующие: r_0 и s_0 — соответственно продольный размер и площадь поперечного сечения образца; r — глубина проникновения электромагнитного поля в образец; s — площадь поперечного сечения (у поверхности обрабатываемого образца) диаграммы направленности концентратора-излучателя электромагнитной энергии, вводимой в рабочую камеру.

На **рис. 2** представлен общий вид нерезонансной системы производственного назначения с осесимметричным воздействием электромагнитного поля для обработки (например, сушки) формованной продукции.

Общий вид нерезонансной камеры (печи) бытового назначения для нагрева различной продукции с односторонним воздействием поля приведен на **рис. 3**,

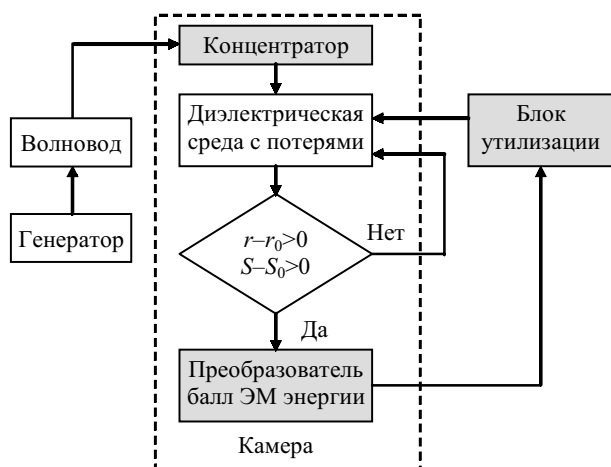


Рис. 1. Модель нерезонансной системы микроволновой обработки материалов

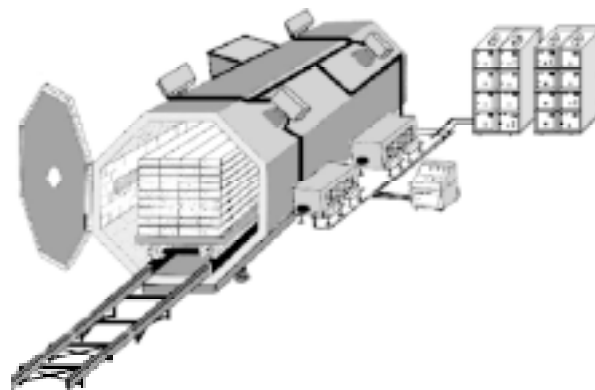


Рис. 2. Камера производственного назначения нерезонансного типа

а зависимости КПД таких камер от уровня их относительной загрузки, построенные по экспериментальным данным, полученным до и после модернизации микроволновых печей известных зарубежных (Японии, Италии, Кореи) и отечественных производителей, представлены на **рис. 4**. Здесь m — загружаемая масса, m_0 — номинальная масса загрузки (принята равной 2 кг).

Сравнительные характеристики уровня плотности потока мощности мешающих излучений из микроволновых камер резонансного типа и из модернизированных рабочих камер нерезонансного типа, измеренные экспериментально с помощью прибора типа TZA-354 (Венгрия) с чувствительностью 0,05 мкВт/см², представлены на **рис. 5** и **6**.

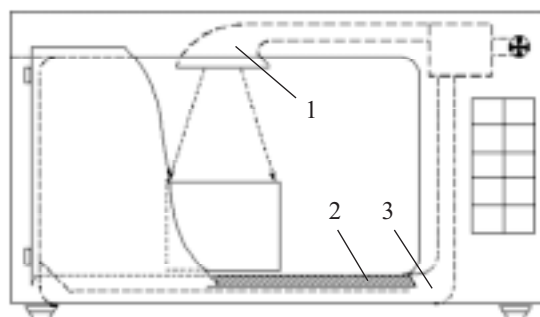


Рис. 3. Бытовая микроволновая печь нерезонансного типа с новыми элементами системы: 1 — концентратор (излучатель); 2 — преобразователь балластной энергии; 3 — элемент теплообменника

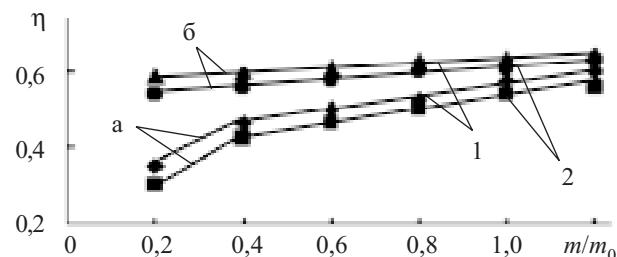


Рис. 4. Зависимость КПД микроволновых камер различного типа от уровня их загрузки до (а) и после (б) модернизации:

1 — камеры типа SMC E70-TFA и Delongi; 2 — камеры типа KOR-6105 и «Дніпрянка-1»

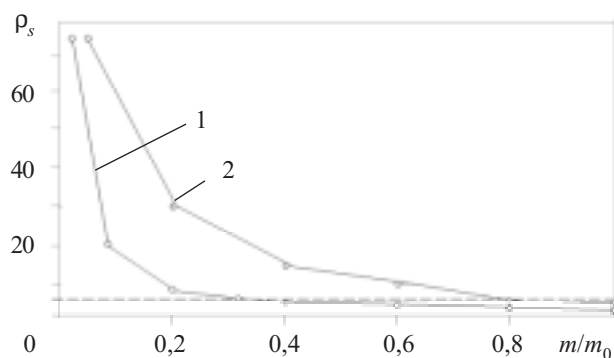


Рис. 5. Зависимость уровня плотности потока мощности излучения из резонансных камер от уровня их относительной загрузки:

1 — камеры SMC E 70-TFA и Delongi; 2 — камеры KOR-6105 и «Дніпрянка-1»

Нерезонансная система микроволновой обработки позволяет, кроме повышения КПД и уменьшения плотности мощности излучений из камеры, реализовать некоторые новые функции, например избирательное воздействие на отдельные компоненты диэлектрической среды. Уровень избирательности обработки двухкомпонентной смеси нетрудно оценить, используя известные уравнения для удельной плотности мощности поля, диссипируемого в обрабатываемой среде и в другом компоненте, например в материале клеток микроорганизмов этой среды. Компоненты отличаются величиной удельной электропроводности σ , диэлектрической проницаемости ϵ , удельной теплоемкости c и массовой плотности ρ .

Коэффициент избирательности обработки компонентов в этой системе K_T представляет собой отношение ожидаемого уровня повышения температуры $\Delta\theta_k$ клеток микроорганизмов к уровню дополнительного повышения температуры $\Delta\theta_c$ продукта при условии отсутствия теплообмена между компонентами, составляющими обрабатываемую продукцию, т. е. при значительной инерционности теплообмена, когда время, необходимое для эффективного теплообмена, значительно больше времени импульсного воздействия электромагнитного поля. В таких условиях это отношение имеет вид [10]

$$K_T = \frac{\Delta\theta_k}{\Delta\theta_c} = \frac{\sigma_k / (c_k \rho_k \epsilon_k^2)}{\sigma_c / (c_c \rho_c \epsilon_c^2)}.$$

В более общем случае, т. е. при произвольной интенсивности воздействия, равной отношению мощности импульса поля к его длительности, коэффициент избирательности является функцией этой интенсивности и определяется с помощью статистической модели, предложенной в [10].

Таким образом, установлено, что реализация процесса микроволновой обработки диэлектрических сред в нерезонансной системе, осуществленная в опытных образцах, построенных согласно предложенным принципам, в отличие от известных, обеспечивает равномерное поле нагрева, практически нулевой уровень мешающих излучений из камеры (по-

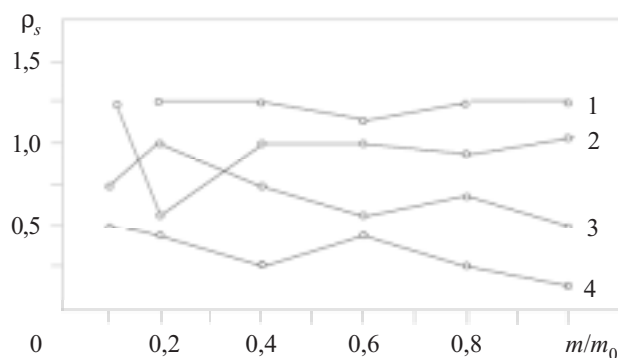


Рис. 6. Зависимость уровня плотности потока мощности излучения из нерезонансных камер от уровня их относительной загрузки:

1 — «Дніпрянка-1»; 2 — KOR-6105; 3 — SMC E 70-TFA; 4 — Delongi

мех), энергетическую эффективность, слабо зависящую от уровня загрузки камеры, работу генератора в режиме бегущей волны.

Воздействие поля, имеющего практически одинаковую интенсивность в произвольных точках объема образца обрабатываемой диэлектрической среды, обеспечивает избирательный уровень нагрева компонентов среды, что способствует реализации перспективных технологических режимов щадящего температурного воздействия поля на отдельные компоненты, например на полезные биологически активные термолabileльные составляющие продукции.

Реализация короткоимпульсного электромагнитного поля в предлагаемой системе с концентрацией излучения и с преобразованием (т. е. поглощением) балластной электромагнитной энергии обеспечивает ослабление уровня мешающего излучения из камеры практически до нуля независимо от длительности импульсов энергии поля, подаваемого в эту рабочую камеру.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Copson D. A. Microwave heating. — Avi, Westport, CT, 1975.
2. Jassie L. B., Kingston H. M. Microwave dissolution in closed vessels under elevated temperature and pressure. — Pittsburgh, 1985, Paper № 108A.
3. Княжевская Г. С., Фирсова М. Г., Килькеев Р. Ш. Высококачественный нагрев диэлектрических материалов. — Л.: Машиностроение, 1989.
4. Демьянчук Б. А. Принципы и применения микроволнового нагрева. — Одесса: Черноморье. — 2004.
5. Демьянчук Б. А. Модель и новые свойства нерезонансных камер микроволнового нагрева диэлектрических материалов // Прикладная радиоэлектроника. — 2008. — Т. 7, № 4. — С. 373—378.
6. Патент України на винахід 85756. Мікрохвильова піч // Б. О. Дем'янчук. — 25.02 2009.
7. Демьянчук Б. А. Материалы-преобразователи электромагнитной энергии в тепловую: требования, технология // Конструирование и конструирование в электронной аппаратуре. — 2006. — № 5. — С. 31—35.
8. Демьянчук Б. А., Полищук В. Е. Синтез ферромагнитных оксидов-наполнителей радиоматериалов // Конструирование и конструирование в электронной аппаратуре. — 2007. — № 5. — С. 61—64.
9. Дем'янчук Б. О. Метод оцінки рівня відбиття електромагнітних хвиль від багатоплощового покриття на металевій підложці // Вісник НУ «Львівська політехніка». — Електроніка. — 2007. — № 592. — С. 164—168.
10. Демьянчук Б. А. Статистическая модель избирательного воздействия электромагнитного поля на составляющие диэлектрической среды // Техника и приборы СВЧ. — 2009. — № 1. — С. 44—48.

С. Г. ДЕМЕНТЬЕВ, к. т. н. Н. Т. КЛЮЧНИК,
В. А. КУЗНЕЦОВ, к. т. н. М. Я. ЯКОВЛЕВ

Россия, г. Москва, ЦНИТИ «Техномаш-ВОС»
E-mail: optdevice@yandex.ru

Дата поступления в редакцию
20.11 2009 г.

Оппонент д. т. н. В. С. СИТНИКОВ
(ОНПУ, г. Одесса)

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДЕМУЛЬТИПЛЕКСОРЫ ДЛЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Представлена технология изготовления сплавленных одномодовых мультиплексоров/демультиплексоров с повышенным коэффициентом оптической изоляции (до 60 дБ) и низкими потерями.

В последние годы широкое распространение получили волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) информации, основанные на спектральном уплотнении каналов с разделением по длине волны (WDM). Для их построения используются специальные оптические устройства — мультиплексоры/демультиплексоры, представляющие собой разветвители спектрально-селективного вида. Необходимо отметить, что в качестве мультиплексоров и демультиплексоров используются одни и те же обратимые оптические устройства спектрального уплотнения, которые далее будем называть демультиплексорами.

В основе работы демультиплексора лежит принцип спектральной селекции по длине волны, которая может осуществляться двумя способами: на основе дифракции и на основе интерференции. Демультиплексоры на основе дифракции используют элементы с угловой дисперсией, такие как дифракционные решетки, которые пространственно разделяют волны разной длины (каналы) по элементам линейки фотодетекторов или торцам оптических волокон [1]. Демультиплексоры на основе интерференции используют свойства таких устройств как спектрально-селективные сплавленные разветвители и оптические фильтры.

В настоящее время демультиплексоры начинают активно применяться для построения локальных систем передачи информации, а также в аппаратуре различного рода подвижных объектов. Так, например, часто стоит задача организации дуплексных систем связи с передачей информации по одному оптическому волокну одновременно в обоих направлениях. В таких системах применяются двухканальные демультиплексоры с уплотнением по волнам длиной 1310 и 1550 нм.

Среди различных типов двухканальных WDM-устройств широкое применение находят демультиплексоры на основе сплавленных одномодовых разветвителей типа 1×2. Такие устройства отличаются достаточно высоким уровнем оптических характеристик и относительно низкой стоимостью.

Основными требованиями к демультиплексорам являются высокий коэффициент оптической изоляции каналов при демультиплексировании и малые значения вносимых потерь. Кроме того, необходима достаточная стойкость к воздействию внешних факторов, в частности к изменению температуры в широком диапазоне от –60 до +85°C.

Анализ характеристик элементной базы ВОСП, выпускаемой в настоящее время рядом зарубежных фирм и отечественных предприятий, показывает, что характеристики промышленных демультиплексоров не в полной мере соответствуют указанным требованиям. Поэтому является актуальной разработка и создание демультиплексоров с улучшенными оптическими характеристиками и повышенной стойкостью к внешним воздействиям. В настоящей работе предлагается технология изготовления таких демультиплексоров на основе сплавленных одномодовых разветвителей.

Принцип работы одномодового сплавленного демультиплексора

Структура двухканального одномодового демультиплексора приведена на рис. 1. Такие устройства изготавливают по технологии биконических разветвителей — производится сплавление двух кварцевых световодов в зоне нагрева и растяжение сплавленного участка. В результате формируется рабочая область демультиплексора — общая суженная зона, ограниченная с двух сторон плавными коническими переходами, которая является областью связи [2]. Уровень мощности, переданной из одного оптического волокна (ОВ) во второе, зависит от длины волны λ_i излучения, передаваемого по i -му волокну, и длины области связи L .

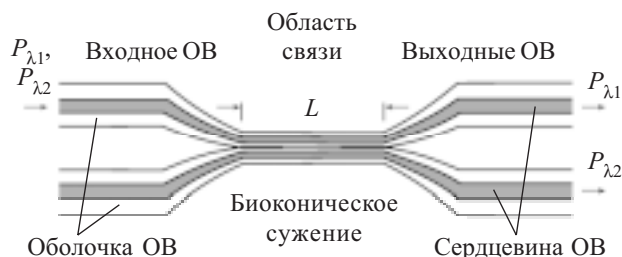


Рис. 1. Схематическое изображение сплавленного демультиплексора

Анализ одномодового биконического разветвителя обычно основывается на рассмотрении распространяющихся в нем двух (четной и нечетной) фундаментальных мод [3, 4]. В результате такого анализа определяются значения мощности оптического излучения P_1 и P_2 в выходных каналах разветвителя:

$$\begin{aligned} P_1 &= P_0 \cos^2[C(\lambda)L] \\ P_2 &= P_0 \sin^2[C(\lambda)L] \end{aligned} \quad (1)$$

где P_0 — входная мощность;
 $C(\lambda)$ — коэффициент связи.

Коэффициент связи, определяющий степень взаимодействия между собственными модами волновода с постоянным поперечным сечением и постоянным показателем преломления (ПП) на длине взаимодействия, рассчитывается по формуле

$$C(\lambda) = \frac{3\pi\lambda}{32n_{cl}a^2} \left[\left(1 + \frac{1}{V(\lambda)} \right)^{-2} + \left(1 + \frac{n_{air}^2}{n_{cl}^2} \frac{1}{V(\lambda)} \right)^{-2} \right], \quad (2)$$

где $2a$ — диаметр перетяжки (области связи);
 n_{cl}, n_{air} — показатели преломления кварцевой оболочки и окружающей перетяжку среды, соответственно;
 λ — длина волны оптического излучения.

Параметр $V(\lambda)$ определяется выражением

$$V(\lambda) = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_{cl}^2 - n_{air}^2}. \quad (3)$$

Из приведенных соотношений видно, что величина оптической мощности в выходных каналах сплавленного разветвителя зависит от длины и диаметра перетяжки, длины волны излучения и ПП кварцевой оболочки и среды, окружающей перетяжку. Так как для реального сплавленного разветвителя значение L фиксировано, а коэффициент связи C зависит от длины волны излучения, такой разветвитель будет обладать спектрально-селективными свойствами.

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента деления мощности от длины перетяжки для излучения с длиной волны 1310 и 1550 нм [5].

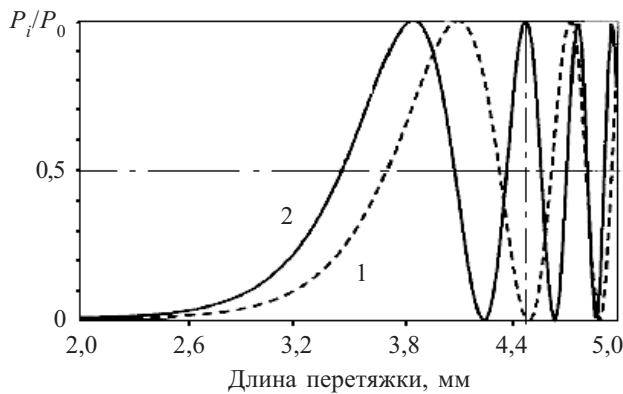


Рис. 2. Зависимость относительной мощности оптического излучения P_i/P_0 в выходном канале демультиплексора от длины перетяжки для волн длиной 1310 нм (1) и 1550 нм (2)

Как видно из рисунка, при определенной длине перетяжки достигается разделение волн различной длины, т. е. режим демультиплексирования. Таким образом, изготавливая разветвитель с областью связи определенной длины, добиваются объединения или разделения волн различной длины.

Основными характеристиками демультиплексора являются вносимые им потери мощности A и коэффициент изоляции $K_{из}$. Для двухканального устройства они определяются следующими выражениями:

$$A = 10 \lg \frac{P_0}{P_i}; \quad K_{из} = 10 \lg \frac{P_0}{P_j}; \quad i \neq j = 1, 2, \quad (4)$$

где P_0 — оптическая мощность во входном канале на длине волны λ_i ;

P_i — оптическая мощность на выходе i -го канала на длине волны λ_i ;

P_j — оптическая мощность в j -ом канале на длине волны λ_j .

С целью повышения коэффициента изоляции используется каскадное соединение демультиплексоров, показанное на рис. 3.

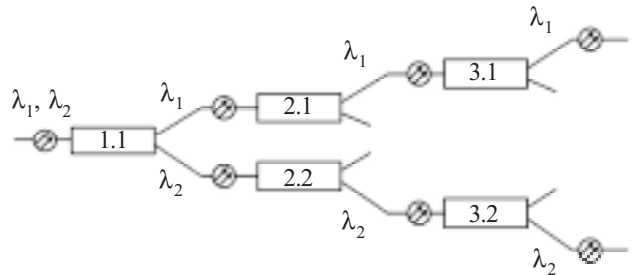


Рис. 3. Каскадный демультиплексор с повышенным коэффициентом оптической изоляции ($N=3$)

В этом случае характеристики демультиплексора определяются как

$$A = \sum_{m=1}^N A_m + (N-1)A_{св}; \quad K = \sum_{m=1}^N K_m, \quad (5)$$

где N — число последовательно соединенных звеньев в каскаде демультиплексоров;

A_m и K_m — вносимые потери и коэффициент изоляции демультиплексора с номером m , соответственно;

$A_{св}$ — потери в сварном соединении волокон.

Методика изготовления демультиплексоров

Технология изготовления демультиплексоров аналогична технологии изготовления сплавленных волоконных разветвителей и основана на сплавлении двух одномодовых волокон с одновременной растяжкой зоны соединения (рис. 4) с целью получения

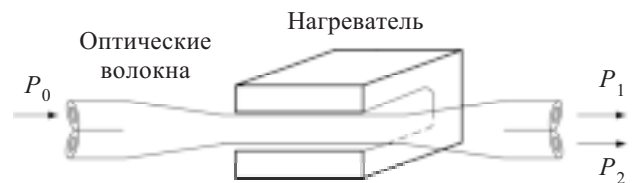


Рис. 4. Метод изготовления сплавленных волоконных демультиплексоров

плавного биконического перехода, необходимого для оптической связи между волокнами [2].

Очищенные от защитного покрытия поверхности участков оптических волокон соединяются между собой, закрепляются на подвижных каретках устройства растяжки и помещаются в нагреватель. После нагрева до температуры, обеспечивающей сплавление волокон, производится растяжка зоны сплавления с целью получения плавного биконического перехода. Основными технологическими параметрами при изготовлении разветвителей являются температура нагрева волокон и скорость растяжения зоны сплавления. Для обеспечения плотного соединения волокон между собой может использоваться их скрутка вокруг продольной оси.

В процессе растягивания зоны сплавления измеряются текущие значения мощности излучения P_1 и P_2 в выходных портах. Процесс останавливается после некоторого заданного количества осцилляций выходной оптической мощности, когда мощность в одном из выходных каналов достигает минимального значения.

Сформированная таким образом сплавленная структура закрепляется на подложке из кварцевого стекла при помощи акриловой полимерной композиции с добавлением наполнителя, обеспечивающего низкое значение температурного коэффициента расширения. Для последующей герметизации такая структура помещается в металлический цилиндрический корпус диаметром 3 мм и длиной 65 мм.

Экспериментальные исследования

Изготовление демультиплексоров осуществлялось на установке для производства разветвителей FCI-0201 фирмы NTT AT (Япония). В ней для нагрева волокон используется керамический микронагреватель, обеспечивающий высокую стабильность температуры в зоне нагрева, что улучшает воспроизводимость процесса. Для изготовления использовалось одномодовое оптическое волокно типа SMF-28 с диаметром (сердцевина/оболочка) 8/125 мкм, диаметром модового пятна 9,2 мкм на длине волны 1310 нм и числовой апертурой $NA=0,14$.

В результате отработки технологии были определены оптимальные температурно-временные параметры процесса. Температура нагрева зоны сплавления

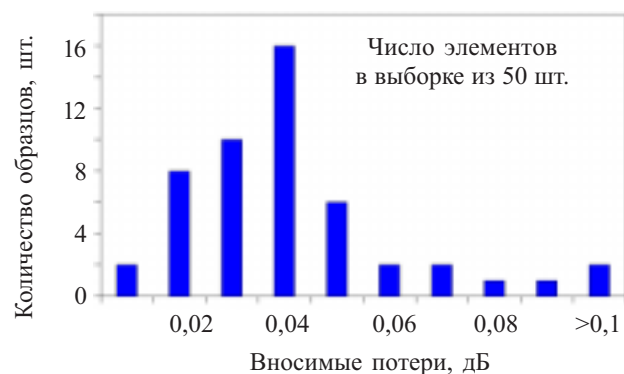


Рис. 5. Гистограмма распределения потерь, вносимых демультиплексорами

волокон составляла 1500—1550°C, скорость растяжения $v(t)$ выбиралась не выше 60 мкм/с.

На рис. 5 приведена гистограмма распределения вносимых демультиплексорами потерь мощности, полученная на основе измерения характеристик образцов в партии из 50 шт. Анализ гистограммы показывает, что вносимые изготовленными образцами потери не превышают 0,1 дБ, причем более 80% от общего количества разветвителей имеют потери, не превышающие 0,05 дБ.

Коэффициент оптической изоляции каналов демультиплексора составлял 18—20 дБ. Для получения более высоких значений коэффициента изоляции использовалось каскадное соединение трех звеньев демультиплексоров в соответствии с рис. 3. Соединение волоконных выводов демультиплексоров производилось методом сварки с использованием промышленного аппарата для сварки оптических волокон. Экспериментально полученная гистограмма распределения вносимых сварным соединением потерь приведена на рис. 6. Среднее значение потерь составило 0,03 дБ.

Потери, вносимые трехзвенным каскадным демультиплексором, включающие суммарные потери в трех сплавленных демультиплексорах и в двух сварных соединениях, составили не более 0,4 дБ. Типичная спектральная характеристика такого демультиплексора приведена на рис. 7.

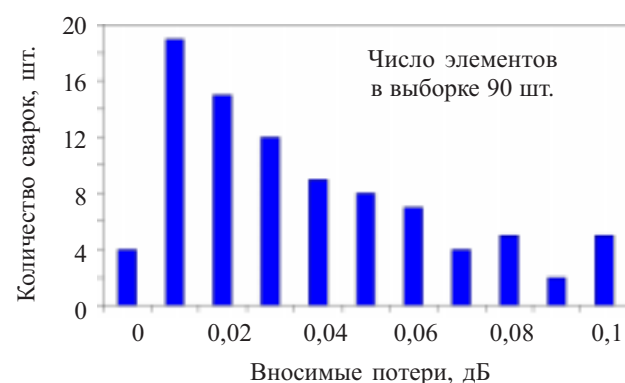


Рис. 6. Гистограмма распределения потерь, вносимых сварным соединением, при создании демультиплексора с повышенной оптической изоляцией

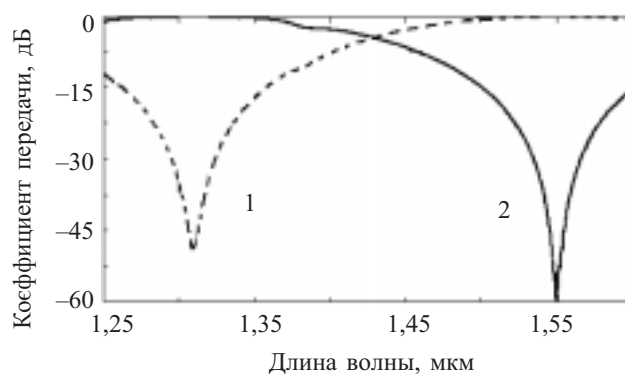


Рис. 7. Спектральная характеристика каскадного демультиплексора, состоящего из трех звеньев, для канала волны длиной 1550 нм (1) и 1310 нм (2)

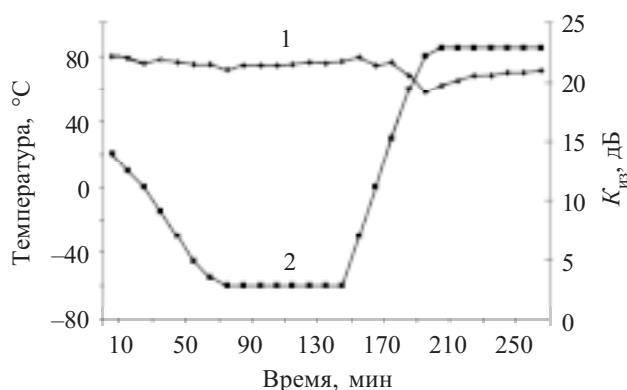


Рис. 8. Изменение коэффициента оптической изоляции $K_{из}$ (1) соответственно изменению температуры (2) де-мультиплексора

Как видно из графика, малая величина вносимых потерь сохраняется в широком спектральном интервале (± 50 нм). Узкие минимумы на спектральных зависимостях соответствуют коэффициентам оптической изоляции.

Были проведены испытания де-мультиплексоров на стойкость к температурным воздействиям, которые включали в себя испытания на воздействие максимально повышенной ($+85^\circ\text{C}$) и максимально пониженной температуры среды (-60°C). Изменение величины вносимых потерь в указанном диапазоне температуры не превышало 0,1 дБ, а минимальное значение коэффициента оптической изоляции составило

20 дБ. Типичная картина изменения коэффициента оптической изоляции от температуры, полученная экспериментально, приведена на рис. 8.

Таким образом, на основе проведенного анализа функционирования и метода изготовления сплавленных одномодовых мультиплексоров/демультиплексоров были созданы образцы с повышенным коэффициентом оптической изоляцией каналов (до 60 дБ) и с потерями, не превышающими 0,4 дБ. Экспериментально подтверждена их устойчивость к изменению температуры среды от -60 до $+85^\circ\text{C}$.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Берикашвили В. Ш., Ключник Н. Т., Костенко К. Н., Яковлев М. Я. Интегрально-оптические волноводные дисперсионные элементы для ВОЛС // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2005. — № 2. — С. 10—16.
2. Рождественский Ю. В. Сплавные волоконно-оптические мультиплексоры/демультиплексоры и их применение в телекоммуникационных системах // Фотон-экспресс. — 2004. — № 1. — С. 16—18.
3. Иванов А. Б. Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения. — М.: Компания Сайрус системс, 1999.
4. D. Marcuse. Theory of dielectric optical wave-guides. — Boston: Academic Press, 1991.
5. Ключник А. Н., Костенко К. Н., Фаловский В. Ф., Яковлев М. Я. Одномодовые спектрально-селективные разветвители для систем передачи информации // Матер. 12 Междунар. науч.-технич. конф. «Высокие технологии в промышленности России». — М.: ЦНИТИ «Техномаш». — 2006. — С. 305—310.

НОВЫЕ КНИГИ

Нефедов А. В. Взаимозаменяемые интегральные схемы.— М.: РадиоСофт, 2009.— 352 с.

В справочнике представлены интегральные схемы, выпускаемые в странах СНГ и Прибалтики, и их зарубежные аналоги. Приведены функциональные назначения, электрические параметры, изготовители, номера технических условий, типы корпусов. Для инженерно-технических работников и радиолюбителей, занимающихся разработкой, эксплуатацией и ремонтом радиоэлектронной аппаратуры.

Черепанов В. П. Диоды и их зарубежные аналоги.— М.: РадиоСофт, 2009.— 632 с.

В четвертый, дополнительный, том издания вошли справочные сведения о новых приборах, запущенных в серийное производство отечественными заводами-изготовителями после 2000 года. Приводятся электрические и эксплуатационные характеристики полупроводниковых приборов — выпрямительных диодов и столбов, диодных сборок, блоков модулей, матриц, стабилизаторов и ограничителей напряжения, а также охладителей для силовых диодов. Приведена также классификация и система обозначений, основные стандарты для описанных в справочнике приборов, сведения об их основном назначении, габаритных и присоединительных размерах и маркировке. В приложении представлены зарубежные аналоги полупроводниковых диодов и названия фирм-изготовителей, а также перечень полупроводниковых диодов, вошедших в четыре тома. Для инженерно-технических работников, занимающихся разработкой, эксплуатацией и ремонтом радиоэлектронной аппаратуры.



К. т. н. Ю. К. ВАСИЛЬЕВ, С. Б. НЕСТЕРОВ, Т. С. ВАСИЛЬЕВА

Россия, г. Москва, НИИ вакуумной техники им. С. А. Векшинского
E-mail: sbnesterov@niivt.ru

Дата поступления в редакцию
24.11 2009 г.

Оппонент к. т. н. С. М. ЗАВАДСКИЙ
(НИЧ БГУИР, г. Минск)

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СРЕДСТВ СОЗДАНИЯ БЕЗМАСЛЯНОГО ВАКУУМА

Показано влияние развития полупроводниковой промышленности на основные современные тенденции развития вакуумной техники и рынка вакуумного оборудования.

Область применения вакуума постоянно расширяется, но до сих пор наиболее важным его применением остается электронная техника. В электровакуумных приборах вакуум является одним из основных условий их функционирования в течение всего срока службы. Для обеспечения работоспособности современного электронного оборудования к вакууму предъявляются все более жесткие и разнообразные требования. Прежде всего, это требования чистоты и уровня вакуума, особенно в полупроводниковых приложениях, где процессы нанесения тонких пленок, ионного травления, литографии обеспечивают получение элементов электронных схем субмикронных и нанометровых размеров. В последнее время активное развитие получили высокоточные и наукоемкие технологии с использованием чистого вакуума. Это, например, фотоэлектротехника (photovoltaics) и все, что связано с изготовлением и использованием фотоэлементной аппаратуры для солнечной энергетики, плоскопанельные дисплеи и т. п. В таких относительно новых областях применения вакуумной техники формируются собственные требования к оборудованию — повышенный уровень надежности при длительной непрерывной работе и повышенной газовой нагрузке, толерантность к пыли и твердым частицам, высокая производительность в диапазоне давлений 10^3 — 10^{-4} мбар.

Тенденции развития рынка безмасляного вакуумного оборудования

В [1] приведены основные направления развития приложений, в которых применяется вакуумное оборудование. Например, один из наиболее емких рынков в мире — японский — показывает распределение потребителей, приведенное на рис. 1.

Как видно из диаграммы, по состоянию на 2001 год основной потребитель здесь — полупроводниковая промышленность. В настоящий момент она заметно потеряла свои позиции, при этом доля производителей плоскопанельных дисплеев существенно выросла — примерно до 2 млрд. долларов США в 2008 году,

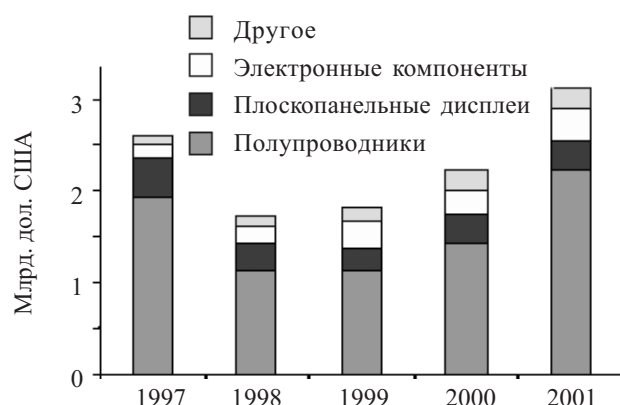


Рис. 1. Распределение японского рынка вакуумного оборудования в 1997—2001 гг.

причем только в Японии. Кроме того, активное развитие получила отрасль, связанная с выращиванием кристаллов и созданием на их основе фотоэлектрических панелей. Например, компания Sharp строит в Японии самый большой в мире завод по выращиванию монокристаллического кремния для создания фотопанелей для солнечной энергетики.

На рис. 2 видно, что среди потребителей вакуумной техники доминирующее положение занимает Азия. Это неудивительно, поскольку именно там сконцентрирована большая часть мирового производства полупроводников, а в последнее время активно развиваются и другие области — фотоэлектротехника, производство плоскопанельных дисплеев и пр.

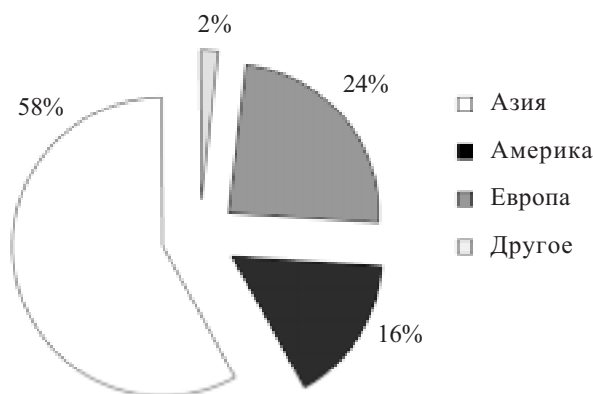


Рис. 2. Распределение по регионам совокупного оборота крупнейших поставщиков вакуумного оборудования

Тип насоса	Основные производители	Предельный вакуум, мбар	Производительность, м ³ /ч
Когтевой (со ступенью Рутса)	Busch, Edwards	0,05	80—600
Винтовой	Busch, Ebara, Edwards, Hanbell, Kashiyama, Leybold (LOT Vacuum), Pfeiffer, Shinko Seiki, Sterling SIHI, Toyota, Ulvac	0,001	75—1300
Многоступенчатый Рутса	Adixen (Alcatel), Kashiyama	0,01	90—220

Рынок форвакуумных средств откачки

Как уже было отмечено, развитие вакуумной техники несколько сместило потребности разработчиков — от высоковакуумных систем к форвакуумным и системам, обеспечивающим средний вакуум (как правило, 10^{-4} мбар).

Основной особенностью развития вакуумной техники на протяжении последних лет является стремление избавиться от вакуумных масел и других рабочих жидкостей. Главными преимуществами замены паромасляных и традиционных механических насосов с масляным уплотнением на безмасляные системы откачки на базе сухих механических насосов [2] является существенное энергосбережение и простота эксплуатации, отсутствие проблемы утилизации рабочих жидкостей и, наконец, другой качественный уровень получаемой продукции.

В таблице приведены типичные характеристики основных типов безмасляных механических форвакуумных насосов для промышленного использования.

Многие производители устанавливают на форвакуумный насос дополнительный насос Рутса, в результате чего примерно на порядок вырастает предельный вакуум и до нескольких раз — производительность. Так, характерная производительность таких систем составляет 600—2500 м³/ч, а предельный вакуум — 0,005—0,0001 мбар. Кроме того, существуют специальные решения для откачки камер больших объемов или для работы с высокими газовыми нагрузками с производительностью в десятки тысяч м³/ч.

Также существенной частью рынка потребителей безмасляных механических форвакуумных систем являются производители установок выращивания различных кристаллических структур — поли- и моно-

кристаллического кремния для изготовления подложек микроэлектронной техники, солнечных батарей и плоскостовых дисплеев, сапфира для разнообразных промышленных применений и т. п. При этом предъявляются повышенные требования к надежной безостановочной работе средств откачки в условиях высоких газовых нагрузок и при наличии твердых примесей в откачиваемом газе.

Лидирующими типами насосов в данной области являются когтевые, винтовые и многоступенчатые насосы Рутса. Это полностью бесконтактные насосы, откачка в которых обеспечивается вращением роторов специальной формы (рис. 3—5), зазоры между которыми очень малы — до микрометров, поэтому уровень обратного потока газа крайне мал.

Когтевой насос выполняется в виде многоступенчатой (обычно из трех или четырех ступеней) машины, где одной из ступеней является двухроторная ступень Рутса, остальные — когтевые. Главной фигурой здесь и обладателем патента на данную конструкцию является компания Edwards.



Рис. 4. Ротаторы винтового насоса

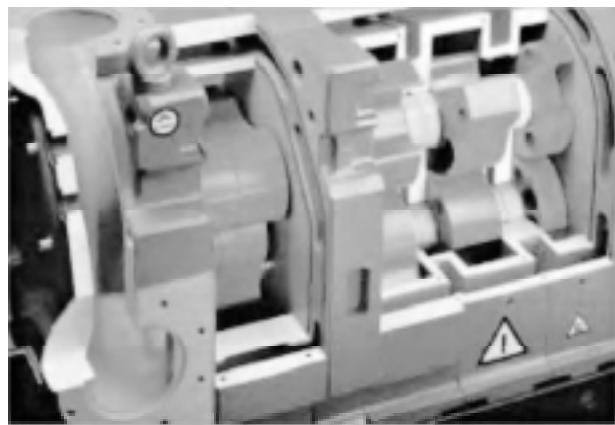


Рис. 3. Когтевой форвакуумный насос

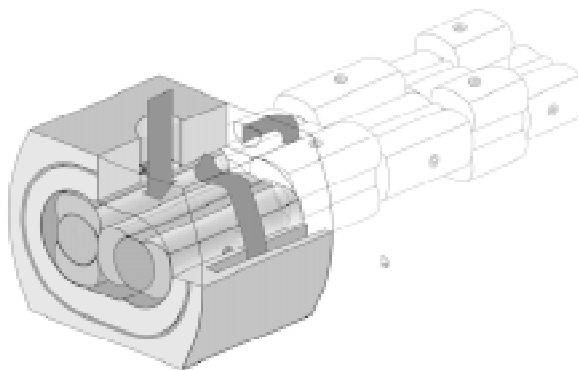


Рис. 5. Многоступенчатый насос Рутса

Винтовые насосы имеют несколько вариантов конструкции — с переменным и постоянным шагом, с напуском газа в торце и в центре роторов, вертикальные и горизонтальные. Такое многообразие конструкций обусловлено тем, что данное направление развивалось наиболее бурно, т. к. развитие когтевой конструкции было ограничено патентом Edwards. В настоящий момент винтовые насосы обеспечивают, пожалуй, наилучшие технические и эксплуатационные характеристики среди всех безмасляных конструкций (см. таблицу), что косвенно признает и главный апологет когтевой конструкции компания Edwards, поскольку первой начала выпуск и винтовых насосов. Наиболее заметными производителями в данной области являются японские компании Ebara и Ulvac, имеющие хорошие позиции в Японии и Азии, корейская LOT Vacuum — в Южной Корее и Европе (под брендом Leybold), а также тайваньский «азиатский тигр» — компания Hanbell, стремительно занимающая лидирующие позиции в Тайване, где сконцентрировано сейчас основное производство полупроводников, кремниевых пластин и плоскостельных дисплеев, в Китае, где активно развиваются данные отрасли, а также выходит на рынки Европы и США.

Еще одна конструкция безмасляных форвакуумных насосов для промышленного использования — объединяющая несколько ступеней Рутса. Основными производителями здесь являются японская компания Kashiyama и французская Adixen (Alcatel). Данное решение не получило такого активного развития как винтовая конструкция в силу своей наибольшей среди других «чувствительности» к грязным и сложным, с эксплуатационной точки зрения, технологическим процессам. Оно предполагает достаточно сложную и длинную конструкцию вакуумных трактов между ступенями, где могут накапливаться конденсат и чужеродные частицы, откачиваемые вместе с рабочим газом.

Указанные типы насосов широко применяются в промышленности в таких отраслях как металлургия, химическая промышленность, полупроводники, установки роста кристаллов, плоскостельные дисплеи и др.

Для лабораторных и «чистых» приложений используются безмасляные форвакуумные спиральные насосы (рис. 6). Поскольку их развитие ограничивает-



Рис. 6. Безмасляный форвакуумный спиральный насос

ся в основном, лабораторными системами, характерный диапазон производительности составляет от 3 до 35 м³/ч. Предельный вакуум, обеспечиваемый такими насосами, обычно составляет 10⁻² мбар. Наиболее весомым производителем здесь является компания Anest Iwata (родоначальник данной конструкции насосов), имеющая самую широкую линейку с производительностью до 60 м³/ч, а также Varian, Edwards, Busch, тоже занимающие заметную долю этого рынка. Надо сказать, что многие компании предлагают насосы Anest Iwata под собственными брендами — такие как, например, Leybold (Oerlikon) и Ulvac.

Конкурирующие решения для лабораторных и «чистых» приложений предлагают компании Adixen — многоступенчатые насосы Рутса малой производительности (от 14 до 38 м³/ч), Pfeiffer и Leybold (Oerlikon) — поршневые безмасляные насосы с производительностью от 15 до 40 м³/ч.

В приложениях, где необходим вакуум уровня 1 мбар и хуже, используют диафрагменные (мембранные) безмасляные насосы — для «чистых» и химико-технологических лабораторных применений; пластинчато-роторные безмасляные насосы для промышленных установок средней производительности — до 200—300 м³/ч; двухроторные (Рутса) и вихревые газодувки для больших промышленных систем нефтехимической, энергетической и других областей, где необходима откачка больших объемов газа до давления уровня 100—500 мбар с производительностью в десятки тысяч м³/ч.

Наряду с вышеизложенным, во всем мире продолжается использование и классических форвакуумных средств откачки с масляным уплотнением, однако оно сокращается, а в таких отраслях как полупроводниковая промышленность и ряде других высокотехнологичных областей практически полностью прекращено. Главным ограничителем повсеместного перехода на безмасляные средства откачки, как правило, является их более высокая стоимость. Однако, как показывает практика, за счет меньших затрат на обслуживание и утилизацию рабочих жидкостей, особенно в промышленных приложениях, стоимость содержания безмасляных систем оказывается ниже, чем масляных.

Рынок высоковакуумных средств откачки

Здесь также четко прослеживается стремление избавиться от масел и рабочих жидкостей. Например, несмотря на дешевизну диффузионных насосов, их использование пытаются максимально сократить во многих областях, до последнего времени считавшихся нечувствительными к остаточным парам рабочих жидкостей в вакуумной камере (электротермическое оборудование, вакуумные печи и т. п.). Там, где полный отказ невозможен или слишком дорог, используются различные ловушки, снижающие количество масляных паров в рабочей области [3].

Наиболее активно развивающимися высоковакуумными безмасляными средствами откачки являются турбомолекулярные и криовакуумные насосы. Магниторазрядные насосы в последние годы разви-

ложений их использования и ограниченности их производительности в 1000—1200 л/с. Следует, однако отметить, что данный тип насосов активно используется в приложениях, где необходимо получать высокий и сверхвысокий вакуум (до 10^{-10} Торр) и удерживать его длительное время, например несколько месяцев (ускорительно-накопительные системы, физика элементарных частиц и т. п.).

В области турбомолекулярных насосов можно отметить несколько тенденций:

— активное распространение так называемых гибридных конструкций, объединяющих турбомолекулярную и молекулярную ступени. Это позволяет лучше откачивать легкие газы, такие как гелий и водород, и увеличивать максимально допустимое давление в форлиннии. В настоящий момент доступны модели насосов, имеющие штатное постоянное давление в форлиннии до 10—12 мбар;

— доминирование насосов с магнитным подвесом ротора (**рис. 7**). Данная конструкция позволяет существенно увеличить наработку на отказ подшипников ротора, поскольку он вращается, левитируя в вакууме в магнитном поле, при этом полностью отсутствует трение. Поскольку в таких насосах смазка отсутствует, при их использовании технологический процесс гарантирован от попадания даже единичных молекул смазки. (Отметим, что турбомолекулярные насосы обычно тоже называют безмасляными, поскольку при их работе крайне низка вероятность попадания даже одиночных молекул смазки в откачиваемый объем — смазка здесь находится внутри закрытых керамических подшипников и обладает крайне малым давлением насыщенных паров (обычно уровня 10^{-14} мбар), однако такая конструкция все же допускает теоретическое попадание одиночных молекул в откачиваемый объем.) Насосы с магнитным подвесом ротора чувствительны к резкому росту давления в вакуумной камере («прорыву атмосферы»), поскольку их роторы испытывают ударную нагрузку при посадке на полной скорости на резервные подшипники. Обычно производители оговаривают характерное количество таких аварийных посадок до возникновения необходимости проведения технического обслуживания — оно может составлять от нескольких десятков до нескольких сотен.

В данном сегменте рынка свою долю имеют все ведущие производители вакуумного оборудования —



Рис. 7. Турбомолекулярный насос с магнитным подвесом ротора

Alcatel, Busch, Edwards, Leybold, Pfeiffer, Osaka Vacuum, Shimadzu, Ulvac, Varian.

В сегменте криовакуумных насосов развитие происходит в направлении, прежде всего, увеличения надежности работы криоголовки и компрессора, а также создания «ударных» моделей и, соответственно, завоевание того или иного сектора рынка. Например, компания Suzuki Shokan разработала и производит крионасос с диаметром условного прохода (Ду) 320 мм, производительность которого в 1,5 раза выше, чем у конкурентов. Это позволило в относительно короткий срок занять доминирующее положение на полупроводниковом рынке Японии и Юго-восточной Азии в области оборудования для создания полупроводниковых приборов на подложках диаметром 300 мм, а наличие одних из лучших по производительности и надежности компрессоров и криоголовок и для насосов других размеров дает возможность компании на равных соперничать с таким признанным лидером японской вакуумной техники как Ulvac, которой подобный подход в свое время позволил завоевать лидирующие позиции в области оборудования для 200 мм подложек. На рынках США и Европы лидером является компания CTI Cryogenics, заметные позиции также имеют Austin Scientific и SHI Cryogenics.

В области крионасосов большой производительности с Ду более 500 мм (**рис. 8**) свои решения предлагают такие компании, как HSR, Leybold, PHPK, Suzuki Shokan, Ulvac.



Рис. 8. Крионасос Ду 600 мм с двумя рефрижераторами Гиффорда–МакМагона

Рынок аналитического вакуумного оборудования

В области измерения вакуума одной из заметных тенденций является развитие универсальных решений, рассчитанных на широкий диапазон давлений. Практически все производители вакуумметров предлагают широкодиапазонные датчики для измерения в области от 10^3 до 10^{-9} — 10^{-10} мбар, которые обычно совмещают два преобразователя в одном корпусе — преобразователь сопротивления (Пирани) в области от 10^3 до 10^{-3} мбар и ионизационный или инверсно-

магнетронный в области от 10^{-3} до 10^{-9} — 10^{-10} мбар. Непосредственно в корпусе датчика интегрирована вся необходимая для преобразования сигнала электроника, и он имеет, как правило, линейный аналоговый и/или цифровой выход, а зачастую и интегрированный дисплей. Данные приборы компактны и обеспечивают точность 15—30% от значения показания во всем диапазоне измерений.

В области форвакуумных измерений основным типом преобразователя является преобразователь Пирани, обеспечивающий точность 10—15% от показания в области от 10^3 до 10^{-4} мбар.

Такие преобразователи предлагают практически все крупные производители вакуумного оборудования, однако, не производя их, а поставляя оборудование своих OEM- и ODM-партнеров. Самыми заметными в данном сегменте рынка являются компании, специализирующиеся на производстве вакуумметров и аналитического оборудования — Canon Anelva, Thyracont, Inficon, Granville-Phillips, MKS Instruments, Varian и другие.

Другим направлением, получившим развитие в последнее время, являются вакуумметры на базе емкостного преобразователя. Этот тип датчиков позволяет определять давление газа с точностью 0,25—0,08% от показания. Обычно такие датчики покрывают диапазон в четыре декады, например от 10^3 до 10^{-1} мбар. Диапазон измеряемых давлений с помощью вакуумметров данного типа — от 10^4 до 10^{-6} мбар. Основными производителями данного оборудования являются MKS Instruments, Setra, Inficon, Canon Anelva.

В области средств течеискания обычно предлагаются два типа решений:

— традиционные гелиевые масс-спектрометрические течеискатели, которые предлагают практически

все крупные поставщики вакуумного оборудования — Adixen, Leybold, Pfeiffer, Ulvac, Varian. Также свою долю имеют компании, специализирующиеся на аналитическом оборудовании — Shimadzu, Canon Anelva, VIC, Inficon, MKS Instruments. Обычно такие масс-спектрометры имеют чувствительность по минимально фиксируемому потоку гелия до 10^{-12} мбар·л/с и достаточно компактное исполнение — масса системы варьируется в диапазоне 30—60 кг;

— средства течеискания, основанные на отличиях от масс-спектрометра принципах определения индикаторного газа. Обладают более низкой чувствительностью, чем масс-спектрометрические течеискатели — обычно до 10^{-7} мбар·л/с, однако характеризуются большей компактностью и меньшей массой — от 1,5 до 15 кг и работают в режиме щупа, забирая пробы при атмосферном давлении. Кроме компактности к их достоинствам нужно отнести возможность использования в качестве индикаторного не гелия, а другой газ. Поэтому данные течеискатели активно используют для поиска течей в криогенных трубопроводах, рефрижераторах, газовых трактах и т. п. Здесь заметные позиции занимают компании Varian, Ulvac, Adixen, Ion Science.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Васильев Ю. К., Нестеров С. Б., Васильева Т. С. Анализ современного состояния рынка оборудования систем создания и поддержания вакуума // Вакуумная техника и технология.— 2006.— Т. 16, № 1.— С. 55—62.
2. Перспективные технологии вакуумирования // НМ-оборудование.— 2004.— № 2.— <http://www.nmet.ru/i/2/last.html>
3. Васильев Ю. К., Нестеров С. Б. Современные пути оптимизации откачных вакуумных систем на базе диффузионных насосов // Материалы IV МНТК «Вакуумная техника, материалы и технология».— Россия, г. Москва.— 2009.— С. 81—84.

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

- Экспериментальное доказательство экситонно-плазменного фазового перехода Мотта. (Германия, г. Штутгарт)
- Цифровой метод измерения коэффициента отражения поверхности. (Украина, г. Одесса)
- Устройство формирования элементов оптоэлектронной акустооптической вычислительной среды. (Украина, г. Донецк)
- Оптоэлектронные сенсоры газов на основе многоэлементных источников ИК-излучения. (Украина, г. Мукачево)
- Оптимизация струйной технологии изготовления коммутационных элементов печатных плат. (Украина, г. Львов; Германия, г. Нюрнберг)
- Измерительные преобразователи на основе ионоселективных полевых транзисторов для ферментного анализа токсичных примесей в водных растворах. (Украина, г. Киев)
- Микропроцессоры звездобразной структуры с расширенными функциональными возможностями. (Украина, г. Одесса)



- Многоканальные устройства цифровой обработки сигналов с ранжированной архитектурой. (Украина, г. Одесса)
- Тепловизионный приемник для средней инфракрасной области спектра на основе матричного КРТ ФПУ формата 128×128. (Украина, г. Киев)
- Технология создания перестраиваемой линии задержки СВЧ-диапазона на основе сегнетоэлектрических и алмазных пленок. (Россия, г. Фрязино)

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

К. ф.-м. н. С. В. ДУДИН, Д. В. РАФАЛЬСКИЙ,
к. ф.-м. н. А. В. ЗЫКОВ

Украина, Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина
E-mail: stanislav_dudin@rambler.ru

Дата поступления в редакцию
21.12 2009 г.

Оппонент д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН
(НУ «Львовская политехника», г. Львов)

ШИРОКОАПЕРТУРНЫЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ИСТОЧНИК ИОНОВ НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ С ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ

Разработанный источник ионов позволяет управлять энергией и плотностью тока пучка. Полученные результаты можно использовать в технологиях производства производства опто- и микро-электронных приборов.

В настоящее время широкоапертурные источники ионов (**ИИ**) низкой энергии широко используются в различных технологиях, в частности для травления микро- и наноструктур при производстве оптоэлектронных устройств, магнитных головок, интегральных микросхем и в других микро- и нанотехнологиях [1, 2]. В последние годы высокочастотные источники ионов быстро вытеснили источники с накаливаемым катодом (источники Кауфмана) и источники с полым катодом, поскольку они практически не требуют обслуживания и значительно лучше совместимы с химически активными газами [3, 4]. На сегодняшний день для технологических применений разработаны и серийно выпускаются ВЧ ИИ с диаметром пучка до 500 мм [3—5], которые, как правило, работают в диапазоне энергий 50—1000 эВ. В отдельный класс можно выделить ВЧ ИИ для накачки энергии в термоядерные установки, которые характеризуются гораздо большим энерговыделением в пучок (достигнуты значения тока пучка до 90 А при значениях энергии ионов десятки килоэлектронвольт).

Во всех перечисленных ИИ в качестве плазмообразующей ступени применяется ВЧ-разряд индукционного типа, а для формирования пучка используется многосеточная (как правило, трехсеточная) ионно-оптическая система (**ИОС**). Такая система состоит из тонких перфорированных электродов (сеток), расположенных на расстоянии нескольких миллиметров друг от друга, к которым приложены значительные, до десятков киловольт, потенциалы. Поскольку ИОС имеют достаточно большие поперечные размеры и подвергаются существенным термическим нагрузкам, изготовление, юстировка и поддержание геометрии сеток в процессе работы — весьма сложные задачи, а сама ионно-оптическая система является одним из наиболее дорогостоящих узлов ИИ. К тому же, применение трехсеточной ИОС требует приме-

ния дополнительного высоковольтного источника питания (даже при низкой энергии ионов) с необходимостью тщательной подстройки напряжения, а также появляются такие специфические проблемы как загрязнение изоляторов и межсеточные пробой.

От этих недостатков свободны односеточные ИИ, в которых ускорение ионов происходит в слое объемного заряда между плазмой и извлекающей сеткой. Применение таких источников целесообразно в технологиях ионно-химического травления с невысокой энергией ионов (до 300 эВ). Возможна работа с более высокими значениями энергии (500 эВ и выше), однако при этом происходит интенсивное распыление сетки, что снижает ее ресурс и приводит к загрязнению пучка металлическими ионами. Односеточный ИИ, описанный в [6], основан на разряде с накаливаемым катодом, что ограничивает ресурс при работе с химически активными газами. Кроме того, для ионно-лучевой обработки поверхностей при помощи такого ИИ необходима нейтрализация как объемного заряда пучка, так и тока ионов, особенно в случае обработки диэлектриков. Обычно для этой цели используется инжекция электронов в пространство транспортировки ионного пучка при помощи нейтрализатора, который представляет собой отдельное устройство, основанное либо на эффекте термоэлектронной эмиссии, либо на газовом разряде. Нейтрализатор требует использования дополнительных источников питания и зачастую имеет ограниченный срок эксплуатации.

В то же время известен высокочастотный источник ионов [7], обладающий уникальной способностью одновременно генерировать потоки положительных ионов и электронов [8]. Применение для питания ИОС высокочастотного напряжения позволяет не только избавиться от необходимости применения дополнительного нейтрализатора, но и повысить эффективность извлечения ионов, а также избежать образования микродуг на сетке, опасность возникновения которых всегда присутствует при использовании для ускорения ионов постоянного напряжения выше 100 В. Плазмообразующая ступень источника основана на ВЧ-разряде индукционного типа, причем, поскольку индукционный разряд взаимодействует с высокочастотным напряжением, прикладываемым к ИОС для ускорения ионов, можно говорить о самостоятельном типе газового разряда — комбинированном индукционно-емкостном ВЧ-разряде [9].

Данная работа была выполнена при поддержке Министерства промышленной политики Украины (НИОКР № г.р. 0107U010814)

Систематические исследования комбинированно-индукционно-емкостного ВЧ-разряда и формирования интенсивных низкоэнергетичных потоков ионов на протяжении многих лет проводятся в Харьковском национальном университете [10—16]. Результатом этих исследований явилась разработка целого ряда высокочастотных источников ионов с диаметром пучка от 20 до 250 мм [12—16]. В данной статье описан один из них, а именно — высокочастотный односеточный источник ионов низкой энергии с диаметром пучка 250 мм.

Экспериментальная установка

Устройство источника ионов иллюстрирует **рис. 1**. В основном объеме источника, цилиндрической газоразрядной камере с внутренним диаметром 250 мм и длиной 80 мм, расположен двухвитковый экранированный индуктор, обеспечивающий генерацию плазмы. К индуктору подведена ВЧ-мощность (13,56 МГц) в диапазоне до 1000 Вт через согласующее устройство. На выходе источника расположена заземленная металлическая сетка толщиной 0,12 мм с отверстиями диаметром 0,24 мм. Рабочая площадь сетки — 490 см², ее оптическая прозрачность — 0,4. При выполнении экспериментов плотность тока ионов в разряде определялась с помощью плоского зонда, расположенного на сетке, на который подавалось смещение –25 В. Постоянное либо ВЧ-напряжение (0—100 В) прикладывается между заземленной сеткой и электродом, ограничивающим разрядную камеру. ВЧ-смещение подключено через разделительный конден-

сатор, благодаря чему на электроде, площадь которого значительно больше площади сетки, возникает положительное напряжение автосмещения. В обоих случаях измеряемой величиной является постоянный потенциал электрода, который будет использоваться далее как главный параметр, определяющий энергию ионов и эмиссионные характеристики источника.

В настоящей работе все потенциалы были измерены относительно заземленной камеры транспортировки пучка. Мишень диаметром 300 мм, принимающая пучок ионов, располагалась на расстоянии 100 мм от выхода источника ионов и была оснащена односеточным энергоанализатором (ЭА) с тормозящим полем. Диаметр отверстий сетки ЭА составлял 0,1 мм, толщина сетки — 0,12 мм, ее прозрачность — 0,2. В качестве рабочего газа использовался аргон, его давление составляло $7,5 \cdot 10^{-4}$ Торр. Для откачки системы использовался турбомолекулярный насос 01АБ-1500 со скоростью откачки 700 л/с и форвакуумный насос НВР-16Д. ВЧ-мощность, подводимая к индуктору, составляла 200 Вт.

Полностью металлическая конструкция с водяным охлаждением всех основных элементов позволяет работать с достаточно большим энергоскладом в источнике. В работе была экспериментально проверена возможность длительной непрерывной работы источника с подводимой ВЧ-мощностью до 2 кВт, однако тепловой режим источника в этих экспериментах позволяет прогнозировать безотказную непрерывную работу ИИ и при большем энергоскладе с соответствующим увеличением тока пучка.

Экспериментальные результаты

Основные характеристики источника показаны на **рис. 2**. Как видно из **рис. 2, а**, максимальная плотность тока ионов на входе ИОС, т. е. наибольшая эффективность ионизации в ВЧ индукционном разряде, достигается при давлении $(2—3) \cdot 10^{-3}$ Торр. С точки зрения транспортировки пучка к мишени такое давление является слишком высоким, поскольку длина свободного пробега ионов становится меньше расстояния от ИОС до мишени. С ростом давления падает не только ток мишени, но и, как показал энергоанализ, значительно снижается доля быстрых ионов. С другой стороны, при давлении газа ниже $5 \cdot 10^{-4}$ Торр индукционный разряд становится трудноиницируемым, а при еще более низком давлении он гаснет. Таким образом, предпочтительным является диапазон рабочего давления $(5—9) \cdot 10^{-4}$ Торр.

Плотность ионного тока из плазмы всегда практически прямо пропорциональна ВЧ-мощности, тогда как зависимость тока мишени от мощности может быть и нелинейной. Дело в том, что прозрачность сетки для ионов растет с ростом энергии ионов и падает при увеличении плотности тока. Нами были проведены исследования ионных и электронных эмиссионных характеристик большого количества сеток с различными размерами и геометрией ячеек, которые были изготовлены по различным технологиям (лазерная резка, электроэрозия, тканые сетки). Результаты этих исследований являются предметом отдельной публикации, здесь же отметим, что описанная в

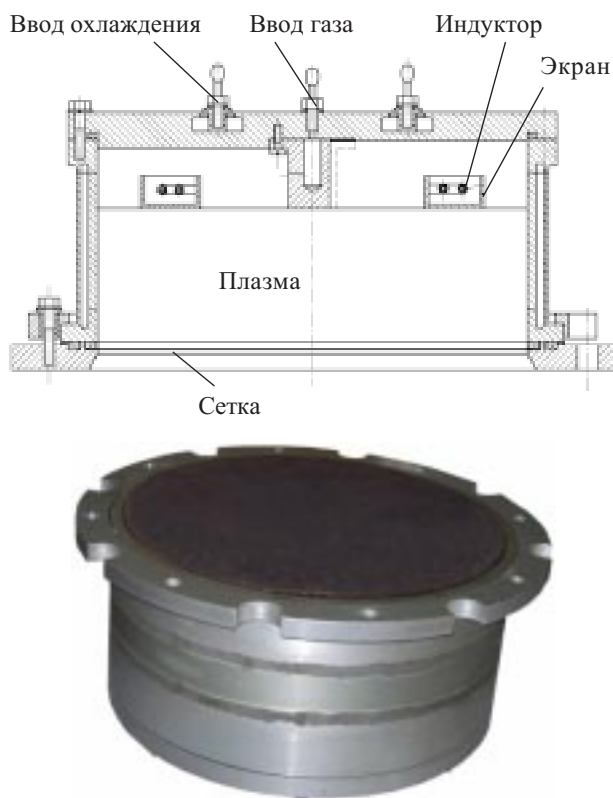


Рис. 1. Принципиальная схема высокочастотного ИИ с односеточной ИОС и его фото

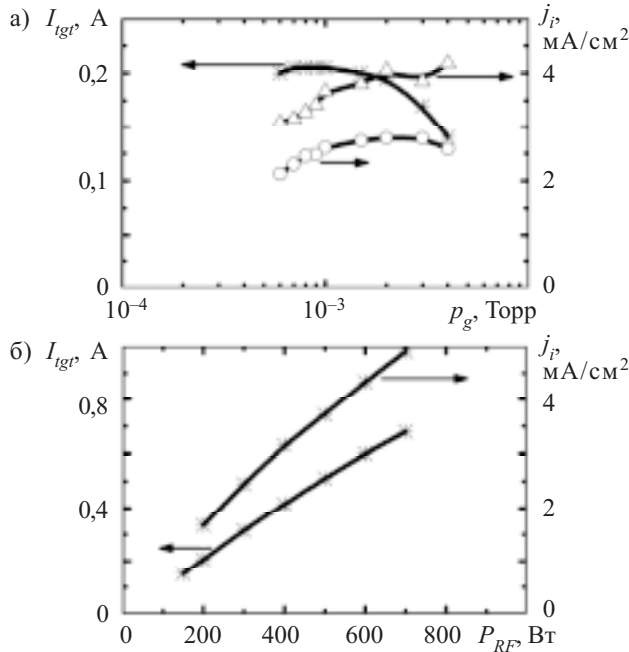


Рис. 2. Зависимость ионного тока мишени I_{igt} (потенциал мишени -25 В) и плотности тока ионов j_i в индукционном разряде для случая ВЧ-смещения на электрод (Δ) и без смещения ($\circ$) от давления (а) и от ВЧ-мощности P_{RF} , вводимой в индукционный разряд (б). Ускоряющее напряжение 50 В

настоящей работе сетка позволяет получать токи пучка до 1 А даже при невысоких (до 100 В) ускоряющих напряжениях (см. рис. 2, б).

Как уже было отмечено, односеточный источник ионов с ВЧ-питанием ИОС способен одновременно эмиттировать потоки как ионов, так и электронов, что позволяет исключить из системы нейтрализатор даже при обработке диэлектрических мишеней. Для получения количественной информации об извлекаемых токах ионов и электронов были измерены ВАХ мишени (рис. 3). Из рисунка видно, что в случае использования постоянного ускоряющего напряжения (кривая 1) мишень при любых потенциалах собирает только ионы, в то время как при использовании ВЧ-

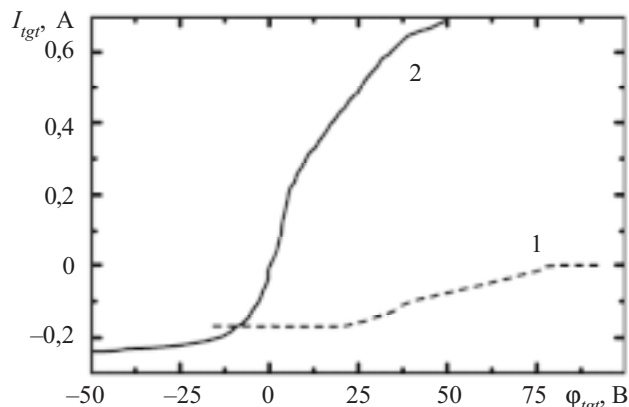


Рис. 3. ВАХ мишени для случая постоянного потенциала на электроде (1) и ВЧ-смещения на электроде (2)

питания ИОС ток мишени имеет обе полярности (кривая 2), что означает присутствие как ионов, так и электронов. В случае ВЧ-смещения ионная ветвь ВАХ имеет хорошее насыщение, а плавающий потенциал мишени близок к нулю, в то время как при постоянном смещении плавающий потенциал мишени близок к ускоряющему напряжению. Если потенциал мишени становится больше плавающего, ток мишени меняет знак, что означает собирание электронов. При достаточно высоких потенциалах мишени (в случае ВЧ-смещения электрода) все электроны, эмитированные источником, достигают мишени, и ее ток стремится к насыщению.

Возможность одновременного извлечения положительных ионов и электронов из плазмы с использованием односеточной системы иллюстрируют результаты измерения функции распределения по энергии (ФРЭ) ионов и электронов. На рис. 4 показаны измеренные энергетические спектры для случаев постоянного и ВЧ-напряжения питания ИОС (кривые 1 и 2 соответственно). В обоих случаях ускоряющий потенциал электрода был равен 120 В. ФРЭ были получены путем дифференцирования вольт-амперных характеристик коллектора при потенциале сетки ЭА, равном 0 В, причем в результате ионный спектр располагается правее нуля потенциала, а электронный — левее. Необходимо отметить, что поскольку используемый ЭА не оснащен дополнительной сеткой для подавления ион-электронной эмиссии с коллектора ЭА, на полученных ФРЭ присутствует еще один пик, соответствующий электронам, эмитированным с поверхности коллектора. Положение этого пика определяется потенциалом сетки ЭА, поэтому при потенциале сетки, равном 0 В, он близок к главному электронному пику и трудноотличим от него. Наши измерения с разными потенциалами сетки ЭА позволили разделить эти пики и определить величину тока вторичных электронов, который никогда не превышал 10% от ионного тока коллектора, поэтому присутствие тока ион-электронной эмиссии не повлияло на полученные результаты.

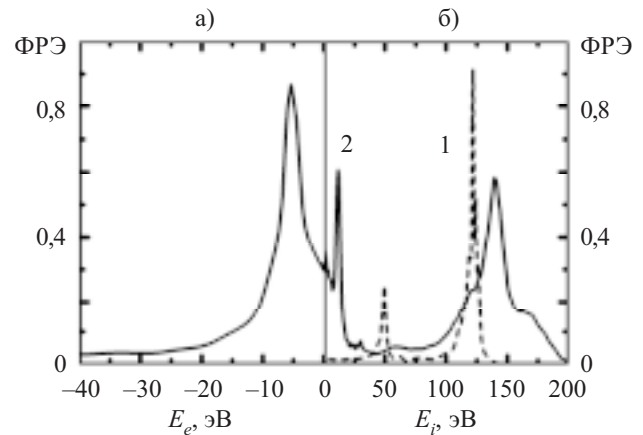


Рис. 4. Функции распределения по энергии (ФРЭ) электронов E_e (а) и энергии ионов E_i (б): 1 — при постоянном напряжении на электроде; 2 — при ВЧ-напряжении на электроде

При ВЧ-питании ИОС на ФРЭ присутствует комбинированный ионно-электронный спектр с острым пиком электронов около нуля и широким пиком пучка ионов вблизи энергии, приблизительно соответствующей ускоряющему потенциалу, что характерно для ускорения ионов в ВЧ-слое, когда время пролета слоя ионом сравнимо с периодом ВЧ-поля [17]. В случае постоянного смещения наблюдается острый ионный пик пучка. Кроме того, в ионной части полученных спектров присутствует еще один пик — вблизи 10 В для ВЧ-напряжения на электроде и вблизи 50 В при постоянном напряжении на электроде. Эти пики соответствуют медленным ионам ионно-пучковой плазмы, возникающей в пространстве транспортировки пучка; их положение определяется потенциалом ионно-пучковой плазмы [18].

Существование большого электронного тока в случае ВЧ-смещения электрода может быть объяснено следующим образом. Известно, что потенциал плазмы, контактирующей с ВЧ-электродом, осциллирует, периодически приближаясь к нулю. В эти моменты электроны из плазмы могут свободно проходить через отверстия сетки.

Необходимо отметить, что соотношением между токами ионов и электронов на мишень можно управлять в широком диапазоне путем изменения потенциала мишени. Из рис. 3 видно, что изменение потенциала на ± 10 В приводит к изменению степени компенсации ионного пучка от некомпенсированного до сильно перекомпенсированного. Это может быть использовано в различных технологиях: травлении подзатворных диэлектриков полевых транзисторов, производстве нанoeлектронных устройств и многих других. Наши измерения с различными потенциалами сетки ЭА показали, что при положительном смещении мишени электроны достигают мишени в виде направленного пучка с управляемой энергией. Вследствие направленности как электронного, так и ионного потоков, описанный источник ионов может составить конкуренцию источникам нейтральных пучков в таких приложениях, как монослойное травление (ALET) [19] и исключение зависимости скорости травления от соотношения ширины и глубины протравливаемого отверстия (ARDE) [20].

Таким образом исследования характеристик разработанного высокочастотного источника ионов с односеточной ИОС показали, что количество эмитируемых электронов достаточно для полной токовой компенсации пучка ионов. Предложенный метод управления соотношением токов ионов и электронов, эмитируемых источником, позволяет изменять это соотношение в очень широких пределах. Использование ВЧ индукционного разряда в источнике позволяет достичь высокой плотности тока ($1\text{--}10\text{ мА/см}^2$) в диапазоне низких значений энергии ионов ($20\text{--}500\text{ эВ}$) с возможностью независимого управления энергией и плотностью тока ионов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Brown Ian G. The Physics and technology of ion sources.— Wiley-VCH, 2004.
2. Roth J. Reece. Industrial plasma engineering. Vol. 2: Applications to nonthermal plasma processing.— CRC Press, 2001.
3. Kanarov V., Hayes A. V., Yevtukhov R. et al. Thirty-five centimeter diameter radio frequency ion-beam source // Rev. Sci. Instrum.— 1998.— Vol. 69, N 2, Part I.— P. 874—876.
4. Hayes A. V., Kanarov V., Vidinsky B. Fifty centimeter ion beam source // Rev. Sci. Instrum.— 1996.— Vol. 67, N 4.— P. 1638—1641.
5. <http://www.oxford-instruments.com>
6. Pat. 4259145 USA. Ion source for reactive ion etching / J. M. E. Harper, H. R. Kaufman.— 31.03 1981.
7. Пат. 1570549 РФ. Высокочастотный источник ионов / А. М. Будянский, А. В. Зыков, В. И. Фареник.— 27.06 1993.; Пат. 2426 Украины от 15.02 1994.
8. Dudin S. V., Rafalskyi D. V. On the simultaneous extraction of positive ions and electrons from single-grid ICP source // Europhysics Letters.— 2009.— Vol. 88, N 5.— P. 55002.
9. Положий К. И. Формирование потоков заряженных частиц в комбинированном индукционно-емкостном ВЧ разряде / Дис. ... канд. физ.-мат. наук.— Харьков, ФТФ ХНУ им. В. Н. Каразина.— 2000.
10. Дудин С. В., Зыков А. В., Положий К. И. Энергетическая оптимизация распылительных систем на базе ВЧ-индукционно-емкостного разряда // Письма в ЖТФ.— 1996.— Т. 22, № 19.— С. 54—59.
11. Дудин С. В., Зыков А. В., Положий К. И., Фареник В. И. Энергетическая цена иона в комбинированном индукционно-емкостном ВЧ разряде // Письма в ЖТФ.— 1998.— Т. 24, № 22.— С. 33—39.
12. Будянский А. М., Зыков А. В., Фареник В. И. ВЧ индукционный источник низкоэнергетичных ионов // Матер. Межотраслевого науч.-технич. семинара «Физические основы и новые направления плазменной технологии в микроэлектронике».— Харьков.— 1991.— С. 26—27.
13. Маишев Ю. П., Фареник В. И., Будянский А. М. и др. Исследование высокочастотного индукционного разряда низкого давления для создания широкоапертурных источников ионов с высокой однородностью тока пучка // Труды ФТИ РАН.— 1999.— Т. 15.— С. 33—59.
14. Пат. 42072 України на корисну модель. Енергоєфективне джерело іонів / С. В. Дудін, О. В. Зиков, Д. В. Рафальський.— 25.05 2009.
15. Dudin S. V., Rafalskyi D. V. Two modes of ion extraction in single-grid ion source // The Third Central European Symposium on Plasma Chemistry.— Kyiv, Ukraine.— 2009.— Book of Abstracts.— P. 172—173.
16. Dudin S. V., Rafalskyi D. V. Influence of ion-beam plasma on the ion extraction efficiency in single-grid ion source // Proceed. of the V international confer. «Electronics and applied physics».— Kyiv, Ukraine.— 2009.— P. 122—123.
17. Lieberman M. A., Lichtenberg A. J. Principles of plasma discharges and materials processing.— New York, Wiley, 2004.
18. Дудин С. В., Рафальский Д. В. Закономерности формирования пучка ионов низкой энергии при помощи односеточной ионно-оптической системы // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2009.— № 6.— С. 42—45.
19. Athavale D., Economou D. J. Molecular dynamics simulation of atomic layer etching of silicon // J. Vac. Sci. Technol. A.— 1995.— N 13.— P. 966—971.
20. Economou D. J. Fast neutral beams for materials processing. // J. Phys. D: Appl. Phys.— 2008.— N 41.— P. 024001—024012.

Д. т. н. Ю. А. ЗАГОРУЙКО, В. А. ХРИСТЬЯН,
к. ф.-м. н. О. А. ФЕДОРЕНКО

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

Дата поступления в редакцию
04.01.2010 г.

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

ФОТОЭЛЕКТРОСТИМУЛИРОВАННАЯ ПАССИВАЦИЯ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ -ДЕТЕКТОРОВ

Предложен новый физический метод пассивации $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ -детекторов, существенно уменьшающий поверхностные токи утечки таких детекторов.

Кристаллический $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ (CZT) является одним из самых перспективных материалов для изготовления датчиков γ - и рентгеновского излучения. С целью уменьшения токовых утечек и предотвращения деградации спектрометрических характеристик детекторов проводят пассивацию их боковых поверхностей. Методы пассивации подразделяются на химические и физические, применяется также комбинация этих методов. Наиболее распространены химические методы, приводящие к образованию на поверхности $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ защитных сульфидных или оксидных пленок. К физическим методам пассивации поверхности относятся метод ионно-лучевого и плазменного распыления пассивирующей защитной пленки в вакуумной установке с использованием электродугового разряда, методы окисления в потоке как низко-, так и высокоэнергетичных атомов кислорода и др. [1—3]. Указанные методы пассивации имеют ряд недостатков: физические — трудоемки и требуют сложной аппаратуры, а химические предполагают контакт образца с водой, которая является потенциальным источником загрязнения поверхности кристалла, что снижает его поверхностное электрическое сопротивление. Поэтому разработка новых эффективных методов пассивации поверхности $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ -детекторов является актуальной задачей.

Исследования проводили на неориентированных образцах ($5 \times 5 \times 4$ мм), которые изготавливали из кристаллов $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, выращенных методом Бриджмена, и подвергали стандартной механической обработке (шлифовке и полировке). На две противоположные грани каждого образца методом химического осаждения наносили золотые контакты. Перед пассивацией и после нее измеряли электрическое сопротивление, токи утечки и вольт-амперные характеристики образцов.

Для пассивации боковой поверхности детекторов ранее [4] нами была предложена фотостимулированная пассивация (ФСП), проведение которой в воздушной атмосфере приводит к образованию на поверхности высокоомных оксидных пленок. Это существенно увеличивает электросопротивление и бо-

лее чем на порядок (в 12—16 раз) уменьшает токи утечки спектрометрических сенсоров. Следует, однако, отметить, что ФСП не позволяет получать толстые (толщиной более 50 нм) высокоомные оксидные пленки, которые необходимы для предотвращения деградации электрических и спектрометрических характеристик детекторов. В то же время экспериментальные исследования [5] показали возможность получения толстых (более 5 мкм) высокоомных пленок ZnO на поверхности кристаллов ZnSe при их окислении в условиях одновременного воздействия интенсивных световых облучений и электрических полей. Поэтому в развитие метода ФСП, с учетом данных [5], нами предложен новый метод пассивации — фотоэлектростимулированная пассивация (ФЭСП) кристаллов $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$.

Метод ФЭСП отличается от метода ФСП тем, что в процессе пассивации на детектор воздействует не только интенсивное УФ-излучение, но и интенсивное постоянное электрическое поле, приложенное к его электродам (рис. 1). В процессе пассивации величину электрического тока, протекающего через детектор, контролируют и поддерживают постоянной путем увеличения приложенного электрического напряжения.

Одновременное нетермическое воздействие УФ-облучения и электрического поля приводит к значительному ускорению окислительно-диффузионных процессов на поверхности кристаллов $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, в результате чего на поверхности подложек образуются высокоомные оксидные пленки толщиной около 150 нм и выше.

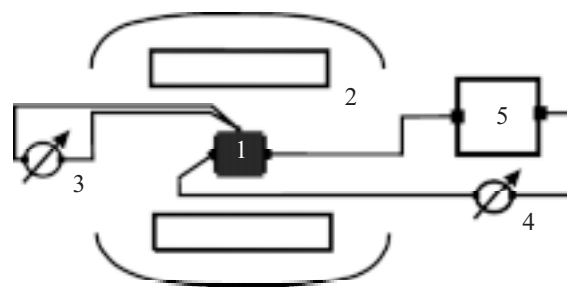


Рис. 1. Схема установки для проведения ФЭСП:
1 — образец; 2 — источники ультрафиолетового излучения; 3 — термопара; 4 — микроамперметр; 5 — источник напряжения

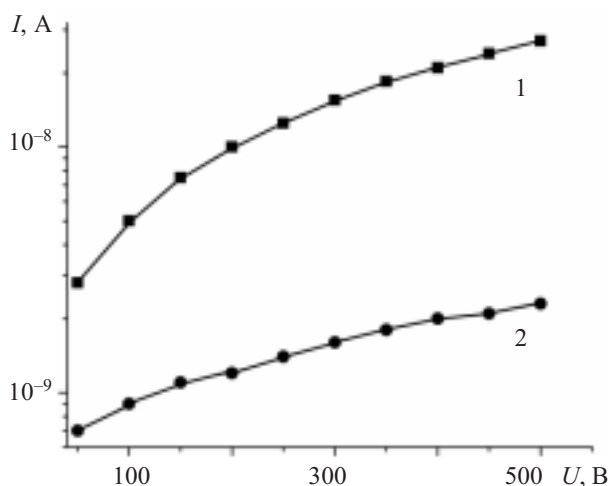


Рис. 2. ВАХ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ -детектора до (1) и после (2) проведения ФЭСП его боковых поверхностей

В исследуемых образцах измерялось электрическое сопротивление и поверхностные токи утечки до и после проведения ФЭСП. Установлено, что сопротивление увеличивалось в 10—25 раз, а токи утечки уменьшались в среднем в 20 раз.

Из приведенных на рис. 2 вольт-амперных характеристик лучшего из исследованных образцов $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ -детекторов видно, что в результате ФЭСП его электрическое сопротивление увеличилось более чем в 26 раз, а токи утечки уменьшились почти в 30 раз. Такое изменение электросопротивления позволяет повысить рабочее напряжение, приложенное к детектору, что необходимо для улучшения его энергетического разрешения.

Полученные результаты указывают на то, что по сравнению с ФСП разработанный метод ФЭСП приводит к более существенному увеличению электрического сопротивления образцов $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ и к уменьшению поверхностных токов утечки в них. Экспериментальные данные свидетельствуют об уменьшении каналов токовых утечек, обусловленных нарушением в приповерхностном слое полупроводникового материала его стехиометрического состава. Вероятно, для толстых высокоомных оксидных пленок, полученных при ФЭСП, снизится также и вероятность деградации их электрических и спектральных характеристик, что, однако, требует специального исследования.

Следует отметить, что разработанный метод ФЭСП не только является технологичным, но и позволяет

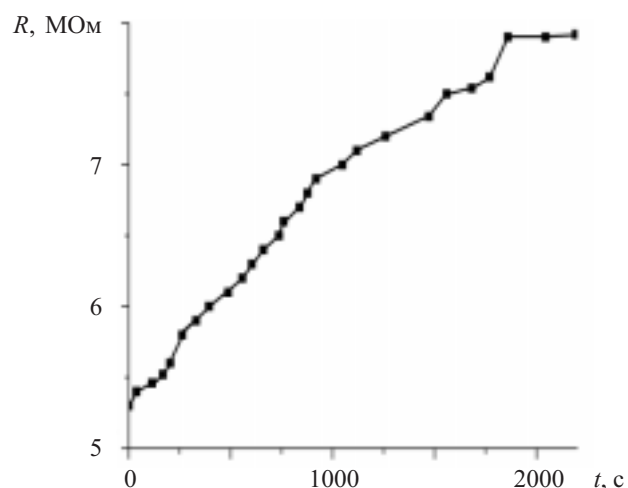


Рис. 3. Изменение электрического сопротивления кристаллов $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ в процессе ФЭСП

непосредственно в процессе пассивации контролировать изменение электрического сопротивления образцов (рис. 3).

Таким образом, предложенный новый перспективный метод фотоэлектростимулированной пассивации $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ -детекторов приводит к еще более существенному, чем фотостимулированная пассивация, увеличению поверхностного электрического сопротивления $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ -детекторов и к снижению токов утечки по их боковым поверхностям.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Pat. 6043106 USA. Method for surface passivation and protection of Cadmium Zinc Telluride crystals / Mark J. Mescher, Ralph B. James, Tuviah E. Schlesinger, Haim Hermon.—28.03 2000.
2. Pat. 7001849 USA. Surface treatment and protection method for Cadmium Zinc Telluride crystals / Gomez W. Wright, Ralph B. James, Arnold Burger, Douglas A. Chinn.—21.02 2006.
3. Rybka A. V., Leonov S. A., Prokhoretz I. M. et al. Influence of detector surface processing on detector performance // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.— 2001.— Vol. A458.— P. 248—253.
4. Пат. 40036 Украины. Способ получения спектрометрического детектора на основе соединения CdZnTe / Ю. А. Загоруйко, О. А. Федоренко, Н. О. Коваленко и др.— 20.02 2009.
5. Zagoruiiko Yu. A., Kovalenko N. O., Mateychenko P. V. et al. ZnO films obtained by photoelectro-thermal oxidation their properties, and possibilities of practical application // Crystallography Reports.— 2008.— Vol. 53, N 7.— P. 1173—1176.

Х. С. АЛИЕВА, С. С. СУЛЕЙМАНОВ,
к. т. н. М. Н. МУРШУДЛИ,

Азербайджан, г. Баку, Национальное аэрокосмическое агентство,
Институт радиационных проблем Национальной Академии наук
E-mail: mnmur@mail.ru

Дата поступления в редакцию
20.10 2009 г.

Оппонент к. т. н. Л. В. ЗАВЬЯЛОВА
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК SiPcCl_2

Рассматриваются электрические и детектирующие свойства пленок фталоцианина кремния. Показано влияние технологических параметров, воздействия температуры и концентрации оксидов азота на эти свойства.

Уже более двух десятилетий фталоцианины активно исследуются в качестве газочувствительных материалов. Относительно малое сопротивление, высокие селективные свойства, хемо- и термостойкость, сравнительная доступность этих материалов делает их перспективными для применения в газочувствительных элементах [1, 2]. О фталоцианинах кремния, в отличие от фталоцианинов меди и никеля, сведений в литературе относительно мало.

Целью настоящей работы было исследование свойств пленок фталоцианина кремния (SiPcCl_2) для возможного использования их в качестве чувствительных элементов (ЧЭ) в газодетекторах.

Объекты и методы исследования

Для получения резистивных ЧЭ методом двухсторонней фотолитографии на одной стороне сапфировой подложки, полированной с двух сторон, формировался гребенчатый резистор с расстоянием между электродами 20 мкм, а на обратной — резистивный нагреватель и измеритель температуры. Формирование пленок фталоцианина кремния методом термического испарения и конденсации в вакууме было заключительной стадией изготовления образцов. Для контроля толщины пленки и контроля процессов, происходящих с пленкой при высокотемпературных и газовых воздействиях, фталоцианин кремния одновременно с резистивными структурами напылялся на кварцевые микровесы. Так как целью данной работы являлось исследование возможности использования пленок фталоцианина кремния в газочувствительных структурах, основное внимание уделялось воспроизводимости и стабильности параметров как при получении пленок, так и в процессе их работы.

В ходе предварительных экспериментов было установлено, что для получения воспроизводимых характеристик и оптимальных детектирующих свойств пленок температура испарителя в процессе напыления должна быть в пределах 300—350°C, а расстояние от подложки до испарителя — 100—110 мм. При

меньших расстояниях становится существенной неоднородность напыляемых пленок и разброс их толщины, а при расстояниях свыше 120 мм значительно уменьшается скорость осаждения. Температура подложки варьировалась в пределах от комнатной до 200°C. Такое увеличение температуры приводило к снижению скорости осаждения почти на порядок. Поэтому для получения оптимальных характеристик пленки температура подложки была выбрана комнатной. Дальнейшее легирование кислородом или последующая высокотемпературная обработка, как это показано в работах для других фталоцианинов [3, 4], оказались не столь эффективными, как «легирование» кислородом в процессе напыления. Малая скорость напыления при относительно невысоком вакууме $((1-3) \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.) позволяет пленке в процессе напыления насыщаться остаточным кислородом воздуха. Толщина пленки варьировалась в диапазоне 0,24—1,1 мкм.

Результаты и обсуждение

Измерения электрических характеристик резистивных структур показали, что зависимость тока от напряжения носит линейный характер вплоть до 10 В, затем появляется нелинейность, возрастающая с ростом приложенного напряжения. Поэтому все дальнейшие измерения проводились при напряжении не более 10 В.

При изменении толщины пленки от 0,24 до 1,1 мкм величина сопротивления уменьшается на два—три порядка. Для пленок толщиной 0,24 мкм исходное сопротивление составляло 10^8-10^9 Ом, а для пленок толщиной 1,1 мкм — 10^6 Ом. Кроме того, наблюдается временной дрейф величины сопротивления. Если принять за R_0 значение начального сопротивления, а за R — значение сопротивления по прошествии некоторого времени (в нашем случае — 10 мин), то при $R > R_0$ дрейф будет положительным, т. е. с течением времени сопротивление растет, а при $R < R_0$ — сопротивление со временем уменьшается (дрейф отрицательный). Из рис. 1 видно, что при низкой температуре дрейф положителен. С увеличением температуры величина R/R_0 уменьшается, и при определенной температуре знак дрейфа меняется. Эта картина характерна для всех пленок независимо от толщины. Однако для пленок разной толщины различен температурный диапазон относительной стабильности сопротивления. С ростом толщины пленки дрейф, как по-

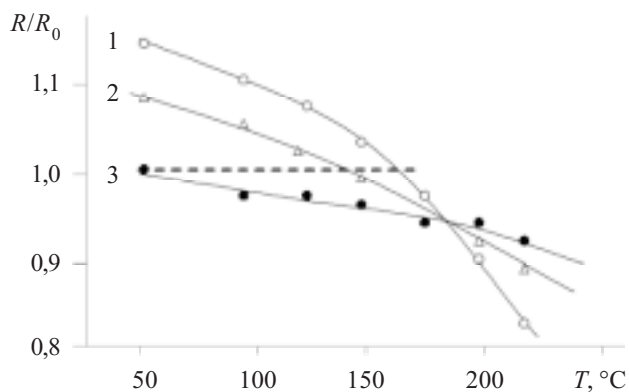


Рис. 1. Температурная зависимость сопротивления ЧЭ при разной толщине пленки фталоцианина кремния (в мкм): 1 — 0,24; 2 — 0,52; 3 — 1,1

ложительный, так и отрицательный, уменьшается, а температура стабильного состояния понижается. Так, для пленки толщиной 1,1 мкм эта температура примерно 50°C, а для пленки толщиной 0,24 мкм — около 170°C.

Для свежеприготовленных образцов резистивных структур на графиках логарифмической зависимости тока I , проходящего через структуру, от обратной температуры T наблюдаются два линейных участка с перегибом при определенной температуре. При высокой температуре крутизна характеристики меньше, т. е. энергия активации проводимости меньше. При малых значениях T крутизна больше. С ростом толщины пленки точка перегиба смещается в сторону более низких T (для пленок толщиной 1,1 мкм эта температура порядка 100°C).

Для неорганических полупроводников характерны обратные зависимости: малый наклон кривой при низкой температуре и большой — при высокой, что характеризует соответственно примесную и собственную проводимости.

Для органических полупроводников чаще всего наблюдаются характеристики, аналогичные вышеприведенной. При многократных измерениях они воспроизводятся и могут быть обусловлены как обратимыми изменениями в структуре пленки, так и изменением механизма проводимости выше определенной температуры.

Уменьшение энергии активации с ростом толщины пленки можно объяснить тем, что с увеличением толщины уменьшается роль поверхностных неоднородностей. Два значения энергии активации в различном диапазоне температуры, по-видимому, обусловлены влиянием на электропроводность поверхностных эффектов и объемных примесей или ловушек, поскольку собственной проводимости соответствуют гораздо большие значения энергии активации [5]. О наличии ловушек или неоднородностей говорит установленный в ряде работ, например в [6], «прыжковый» механизм проводимости во фталоцианинах.

Термообработка при температуре 150—170°C не привела к заметному изменению электрических параметров. Однако отжиг при 220°C привел к уменьшению исходного сопротивления на 1—1,5 порядка

и к уменьшению разброса величины сопротивления для каждого значения толщины пленок. При этом значительно, почти в два раза, возрастает энергия активации проводимости пленок всех трех значений толщины, а график зависимости $\lg I = f(1/T)$ становится монотонным, без перегибов. Таким образом, очевидно, что при температуре 220°C происходит качественное изменение пленки. Аналогичное изменение свойств наблюдалось и для пленки фталоцианина меди после отжига при температуре 225°C [7].

Проверка детектирующих характеристик свежеприготовленных образцов показала, что отклик ЧЭ на воздействие оксидов азота происходит в течение нескольких секунд при любой температуре, однако восстановление свойств — затяжное (10—15 мин). Для ускорения десорбции образцы необходимо прогреть до высокой температуры. Полная десорбция оксидов азота с пленок фталоцианина кремния происходит при температуре выше 230°C.

Так как при температуре 220°C происходит качественное изменение пленки, образцы после напыления в обязательном порядке подвергали термообработке при температуре 230—240°C, для того чтобы в процессе десорбции уже не происходило никаких изменений свойств пленки.

Хорошо известно, что даже помещая образец в вакуумную камеру, из которой откачивают газ при той же температуре, при которой происходила адсорбция, не всегда удается полностью снять с поверхности образца весь адсорбат. Иначе говоря, десорбция происходит не полностью. Для полной десорбции, как правило, требуется существенное повышение температуры [8, с.164].

На рис. 2 приведена экспериментальная зависимость времени десорбции от температуры подложки. Для определения предельно допустимой температуры нагрева подложки, при которой не происходит испарение и деградация пленки, резистивные элементы вместе с контрольными кварцевыми микровесами длительно выдерживались в термостате. После этого измерялось сопротивление пленки и изменение частоты кварцевых микровесов. Эксперименты показали, что вплоть до 250°C изменение частоты не

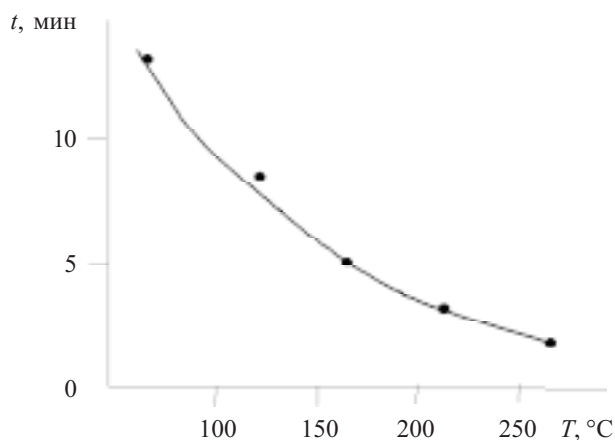


Рис. 2. Зависимость времени восстановления сопротивления ЧЭ после удаления оксидов азота от температуры образца

наблюдается (т. е. материал не испаряется), а при температуре выше 260°C испарение становится заметным. Так, выдержка образца при 260°C в течение 10 ч приводила к испарению $100 \text{ \AA}$ материала (т. е. $10 \text{ \AA/ч}$) и, соответственно, к увеличению сопротивления, что связано с уменьшением толщины пленки. Таким образом, прогрев образцов до температуры $230\text{--}240^{\circ}\text{C}$ для полной десорбции оксидов азота относительно безопасен для пленок.

С ростом температуры понижается адсорбционная способность пленки, т. е. при низкой температуре чувствительность выше. Однако на величину сопротивления влияет влажность воздуха, а при температурах вплоть до 60°C (т. е. до испарения физически сорбированной воды) это влияние значительно. Для исключения влияния влаги нижним пределом работы ЧЭ была выбрана температура 65°C . Все исследования детектирующих свойств резистивных элементов проводились в диапазоне температуры $65\text{--}240^{\circ}\text{C}$, т. к. за пределами этого диапазона использование пленки не представляет практического интереса.

Подача оксидов азота (NO_x) осуществлялась двумя способами: в импульсном режиме — разовый напуск, когда в предельно малый объем с чувствительным элементом запускается определенный объем NO_x , и в непрерывном режиме, когда через объем, содержащий ЧЭ, пропускается поток воздуха, и в этот поток поступает NO_x определенной концентрации. Исследование динамических процессов было необходимо для определения алгоритма работы ЧЭ в составе прибора, т. е. для определения режима подачи измеряемого компонента.

На рис. 3 приведены детектирующие характеристики ЧЭ при малых концентрациях (до 50 ppm) диоксида азота. Из рисунка видно, что для чувствительных слоев различной толщины концентрационная за-

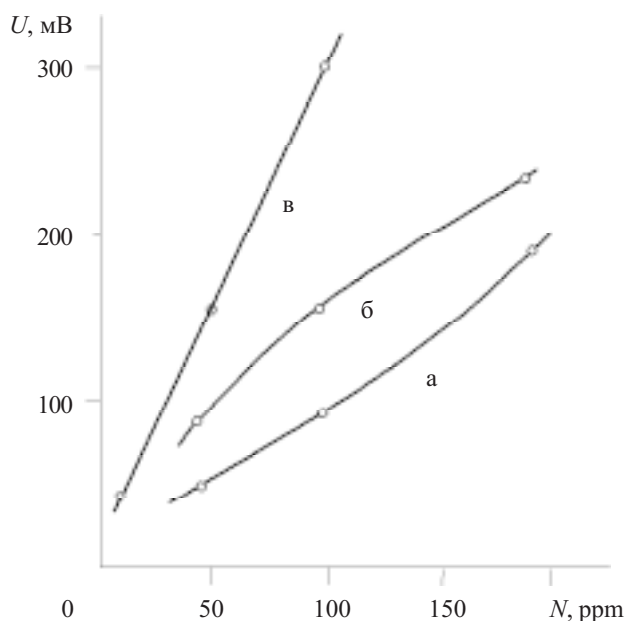


Рис. 3. Зависимость выходного сигнала ЧЭ от концентрации NO_x при разовой подаче газа для чувствительных слоев различной толщины (в мкм): а — 0,24; б — 0,52; в — 1,1

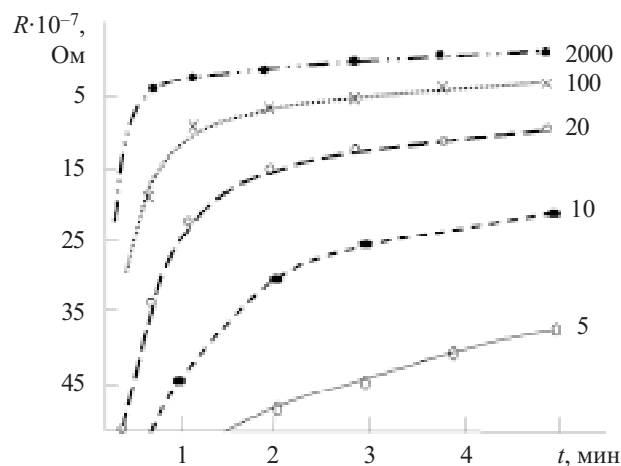


Рис. 4. Зависимость сопротивления ЧЭ от времени для пленок толщиной 0,24 мкм при разовом напуске NO_x с различной концентрацией (в ppm)

висимость падения напряжения на нагрузочном сопротивлении носит практически линейный характер. Величина чувствительности $\Delta U/\Delta N$, т. е. тангенс угла наклона кривых, для слоев толщиной 0,24 и 0,52 мкм почти одинакова, а для слоя толщиной 1,1 мкм почти в 2 раза больше.

На рис. 4 показано изменение сопротивления образца во времени при разовом напуске NO_x . Здесь можно выделить два участка: участок с резким изменением сопротивления, которое происходит за первые 30 с и характеризует быструю адсорбцию, и участок с относительно малым изменением сопротивления от времени, характерным для стадии медленной адсорбции, причем разница в величинах сопротивления при разной концентрации оксидов азота относительно невелика.

Зависимость величины сопротивления ЧЭ от концентрации NO_x при подаче газа в течение разного времени показана на рис. 5.

Из рисунка видно, что наибольшая чувствительность (dR/dN) и линейная зависимость величины сопротивления от концентрации наблюдается в области

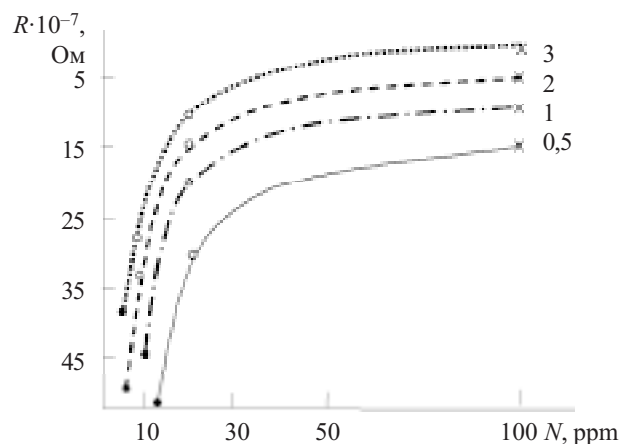


Рис. 5. Зависимость сопротивления ЧЭ при толщине пленки 0,52 мкм от концентрации NO_x при непрерывной подаче газа в течение различного времени (в мин)

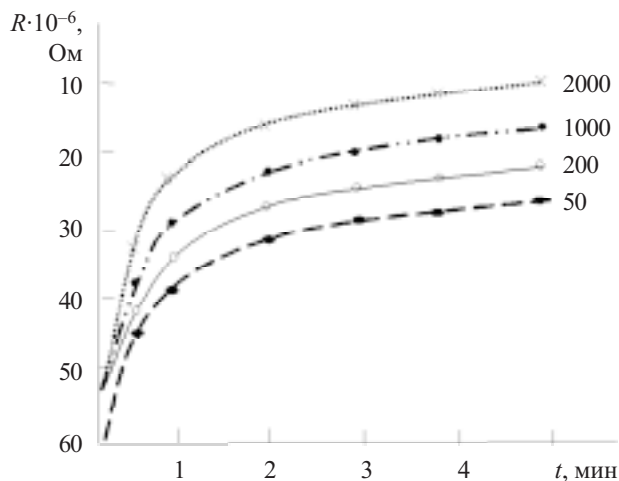


Рис. 6. Зависимость сопротивления ЧЭ при толщине пленки 1,1 мкм от времени при непрерывной подаче газа с разной концентрацией (в ppm)

низких концентраций оксидов азота (до 20 ppm). С увеличением концентрации чувствительность ЧЭ уменьшается.

На рис. 6 показана зависимость сопротивления ЧЭ от концентрации NO_x при непрерывной подаче газа. Как и на рис. 4, на кривых условно можно выделить два участка — быстрой и медленной адсорбции. Некоторое отличие заключается лишь в том, что при непрерывной подаче оксидов азота (рис. 5) наклон кривых, т. е. крутизна участка медленной адсорбции, несколько больше.

Однако несмотря на некоторые различия, детектирующие характеристики ЧЭ при работе в обоих режимах — разовом напуске и непрерывном потоке газа — практически сходны, поэтому важным является выбор не алгоритма напуска детектируемого газа, а алгоритма режима измерений.

Для проверки возможности создания газодетектора на основе таких элементов был изготовлен переносной малогабаритный цифровой измеритель концентрации оксидов азота весом 0,7 кгс с габаритны-

ми размерами 200×70×45 мм. Использовался режим быстрой адсорбции. Диапазон измеряемых концентраций 0—500 ppm.

Таким образом, на основе проведенных исследований установлено, что фталоцианин кремния является перспективным материалом для детектирования оксидов азота. Его чувствительность и стабильность параметров зависят от режима напыления пленки.

Уменьшения дрейфа сопротивления ЧЭ можно достичь выбором оптимальной для каждой толщины пленки рабочей температуры.

Наиболее информативным режимом является режим кинетики адсорбции — измерение изменения величины сопротивления или проводимости образца со временем на стадии быстрой адсорбции.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Sadaoka Y., Jones T. A., Gopel W. Fast NO_2 detection at room temperature with optimized lead phthalocyanine thin-film structures // *Sensors and Actuators*, B1. — 1990. — Is. 1. — P. 148—153.
2. Dogo G. J.-P., Maleysson C., Pauly A. Interaction of NO_2 with copper phthalocyanine thin films II: Application to gas sensing // *Thin Solid Films*. — 1992. — Vol. 219. — Is. 1-2. — P. 251—256.
3. Почтенный А. Е., Мисевич А. В. Влияние адсорбированного кислорода на проводимость пленок фталоцианина свинца // *ПЖТФ*. — 2003. — Т. 29, вып. 1. — С. 7—10.
4. Szuber J., Grzdzil L. Electronic properties of the space charge layer of in situ prepared copper phthalocyanine thin films exposed to oxygen // *Thin Solid Films*. — 2000. — Vol. 376. — Is. 1-2. — P. 214—219.
5. Vidadi Yu. A., Kocharli K. Sh., Barkhalov B. Sh., Sadreddinov S. A. Alternating current investigation of copper phthalocyanine films in the presence of blocking contacts // *Phys. Stat. Sol. (a)*. — 1976. — Vol. 34. — K77—K81.
6. Почтенный А. Е., Сагайдак Д. И., Федорук Г. Г., Мисевич А. В. Прыжковая проводимость во фталоцианине меди и композиционных структурах на его основе // *ФТТ*. — 1996. — Т. 38, № 8. — С. 2592—2601.
7. Yuh-Lang Lee, Chuan-Yi Hsiao, Rung-Hwa Hsiao. Annealing effects on the gas sensing properties of copper phthalocyanine films // *Thin Solid Films*. — 2004. — Vol. 468. — Is. 1-2. — P. 280—284.
8. Волькенштейн Ф. Ф. Физико-химия поверхности полупроводников. — М.: Наука, 1973.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Ефименко А. А., Симонов В. В. Конструирование электронных средств. Механические структуры: Справочник (на украинском языке.) — Одесса: Политехперіодика, 2009. — 548 с.

Справочник содержит широкую техническую информацию, которая поможет упорядочить и облегчить процесс конструирования деталей и сборочных единиц механических структур электронных средств. Это технологические требования, сведения о шероховатости и отклонениях формы и расположения поверхностей, о механических разъемных и неразъемных соединениях, обеспечении взаимозаменяемости, конструкционных материалах и покрытиях. В справочнике также имеются различные общие сведения, необходимые конструктору.

Справочник предназначен для инженеров электронного аппаратостроения, вместе с тем он может быть полезен студентам соответствующих специальностей технических вузов при курсовом и дипломном проектировании.



К. т. н. Е. А. БОГАТЫРЕВ, д. т. н. С. М. СМОЛЬСКИЙ

Россия, г. Москва, Институт радиотехники и электроники МЭИ
E-mail: smolskiysm@mail.ru

80 ЛЕТ СО ДНЯ ОСНОВАНИЯ МОСКОВСКОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Московский энергетический институт (технический университет) в 2010 году отмечает свой 80-летний юбилей. В июле 1930 года МЭИ был образован в результате слияния электротехнического факультета МВТУ им. Н. Э. Баумана и электропромышленного факультета Московского института народного хозяйства им. Г. В. Плеханова, а серьезной причиной тому явился план ГОЭЛРО, предусматривающий быстрое всестороннее развитие энергетики страны, которое было невозможно без оперативной и квалифицированной подготовки инженерных и научных кадров.

МЭИ как высшее учебное заведение политехнического профиля вначале готовил специалистов по десяти специальностям: центральные электрические станции, техника высоких напряжений, электрическое оборудование фабрик и заводов, светотехника, электрические машины, электрические аппараты, электрическая тяга, радиотехника, телефония и телеграфия. Однако интенсивное развитие экономики страны на базе электрификации вскоре потребовало подготовки специалистов в области автоматики, телемеханики, электроники и радиотехники, тесно связанных с новейшими для того времени достижениями науки и техники. Тогда же как самостоятельное подразделение был организован и радиотехнический факультет (РТФ), сначала называвшийся Спецфакультетом.

К 1940 году МЭИ превратился в один из крупнейших вузов страны, который выпускал высококвалифицированных специалистов для энергетики, энергомашиностроения, электроаппаратостроения, автоматами, телемеханики и радиоэлектроники.

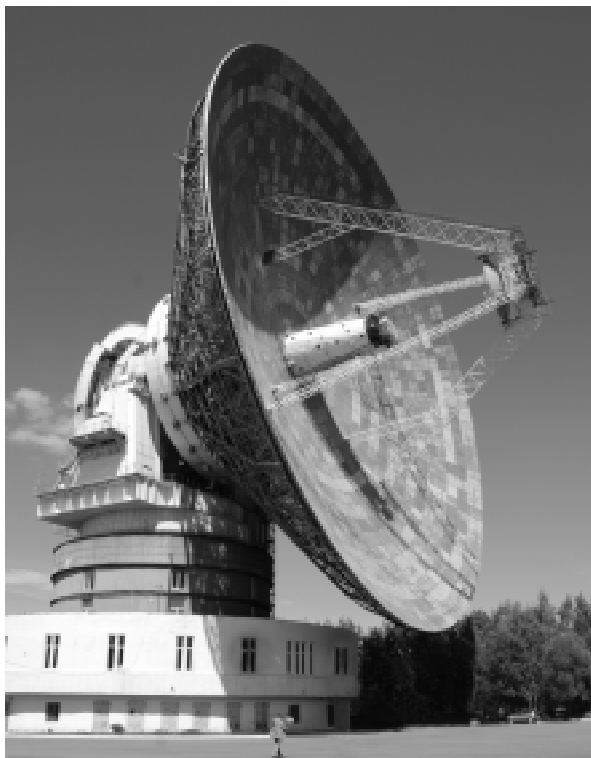
Большим испытанием для профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и студентов МЭИ явились годы Великой Отечественной войны. На фронт ушло более 1500 преподавателей, сотрудников и студентов института; многие из оставшихся в тылу принимали участие в строительстве оборонительных сооружений на подступах к Москве. В октябре 1941 года Правительством страны было принято решение об эвакуации института в Лениногорск, а в Москве был организован его филиал. Но уже в декабре 1942 года МЭИ возвратился в Москву одним из первых.

К своему 80-летию МЭИ, который недавно приобрел статус национального исследовательского университета, подошел с немалыми достиже-

ниями как в подготовке специалистов для народного хозяйства страны, так и в получении весомых результатов научно-исследовательских работ. За эти годы выпущено более 200 тысяч инженеров и специалистов, среди которых академики, члены-корреспонденты РАН, лауреаты Государственных премий, руководители министерств, предприятий и организаций, крупные политики, космонавты, известные деятели культуры. В стенах МЭИ работали такие выдающиеся ученые как основатель московской школы электротехников профессор К. А. Круг, академики С. И. Вавилов, А. Д. Сахаров, К. А. Андрианов, К. И. Шенфер, В. А. Кириллин, М. А. Стырикович, А. Е. Шейн-длин, В. А. Котельников, А. Ф. Богомолов, Н. Д. Де-вятков, Ю. Б. Кобзарев, В. В. Болотин, С. А. Лебедев. В настоящее время в нем работают лауреат премии «Глобальная энергия» академик Э. П. Волков, академик Г. А. Филиппов, академик К. С. Демирчян, целая когорта профессоров, доцентов и научных сотрудников, которые ведут плодотворную работу по подготовке специалистов с глубоким знанием своей специальности и широким техническим, научным и жизненным кругозором.

Сегодня Московский энергетический институт (технический университет) — это крупнейший учебный и научный центр, в состав которого входят семь инженерных институтов — энергомашиностроения и механики, тепловой и атомной энергетики, проблем энергетической эффективности, автоматики и вычислительной техники, радиотехники и электроники, электротехники, электроэнергетики, а также институты технологии, экономики и предпринимательства, гуманитарно-прикладной, институт лингвистики, российско-германский институт МЭИ-ФЕСТО, институт безопасности бизнеса. Всего в университете насчитывается 77 кафедр и 75 научно-исследовательских лабораторий.

Сейчас в МЭИ, только в Москве, не считая филиалов, обучается более 14 тысяч студентов, около 700 аспирантов и докторантов. К учебному и научному процессам вуза привлечены более 2000 преподавателей и научных сотрудников, среди которых 9 академиков и членов-корреспондентов РАН, более 250 докторов и почти 1000 кандидатов наук. Здесь созданы хорошие условия для успешного проведения учебного и научного процессов, удовлетворяющих современным требованиям. В университете имеется уни-



Радиотелескоп с двухзеркальной антенной с профилированными зеркалами ТНА-1500 (полигон ОКБ МЭИ в п. Медвежьи Озера)

кальная, единственная в России, учебно-экспериментальная ТЭЦ; Наносектор, оснащенный современным оборудованием для научных исследований и подготовки кадров в области нанотехнологий; Опытный завод, где производится уникальное оборудование, в том числе для учебных и научных лабораторий; научно-техническая фундаментальная библиотека — одна из крупнейших библиотек технических вузов; Инновационно-технологический центр — настоящий полигон для реализации научных идей молодых ученых и студентов; Издательский дом и Информационно-вычислительный центр.

В настоящее время университет продолжает лучшие свои традиции, благодаря которым в рейтинге технических университетов он неизменно остается в числе первых.

Значителен вклад МЭИ в подготовку специалистов и проведение научных исследований в области радиоэлектроники.

Еще в 1938 году в связи с ростом потребностей страны в инженерах-радиотехниках для их подготовки в МЭИ был организован радиотехнический факультет (РТФ), который очень скоро превратился в один из ведущих среди сходных факультетов радиотехнических институтов страны. Первая базовая кафедра основ радиотехники была сформирована будущим академиком В. А. Котельниковым.

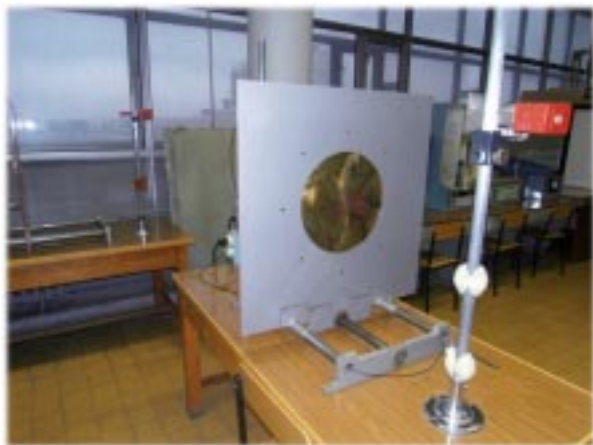
Славная страница в истории РТФ началась в апреле 1947 года, когда по указанию Правительства СССР был создан Сектор специальных работ МЭИ (Спецсектор). Во главе коллектива сектора встали

В. А. Котельников, заведующий кафедрой основ радиотехники МЭИ, будущий вице-президент АН СССР, ученый с мировым именем и Г. А. Левин, заведующий кафедрой радиоприемных устройств, один из крупнейших специалистов страны в области радиосвязи. Позже из этого сектора выросло Особое конструкторское бюро МЭИ, которое долгое время возглавлял академик А. Ф. Богомолов. Коллектив Спецсектора вписал немало замечательных страниц в развитие телеметрии, радиолокации, ракетно-космической техники не только нашей страны, но и всего мира.

В годы становления системы подготовки радиоспециалистов в стране РТФ МЭИ находился на передовых позициях по многим образовательным вопросам. Не случайно долгие годы Комиссию по радиотехнике Министерства образования возглавляли ученые РТФ МЭИ, и здесь большой вклад сделан деканом факультета проф. А. Л. Зиновьевым.

На РТФ впервые была создана специальная кафедра радиотехнических приборов, которая под руководством первого заведующего (будущего академика) Ю. Б. Кобзарева сразу после войны начала готовить инженерные и научные кадры в области радиолокации. Под руководством профессора С. И. Евтянова кафедра радиопередающих устройств МЭИ стала пионером во многих вопросах теории таких устройств, включающих теорию систем фазовой автоподстройки частоты и фазы, методов расчета флуктуаций и обеспечения источников колебаний с чистым спектром, теории транзисторных генераторов, усилителей мощности и автодинов, СВЧ-устройств с рекордными шумовыми характеристиками. Под руководством В. И. Сифорова, члена-корреспондента АН СССР, кафедра радиоприемных устройств активно развивала новые методы и способы приема и обработки радиосигналов на фоне значительных помех, в том числе с использованием полупроводниковых элементов и интегральных схем. Из этой кафедры выделилась кафедра радиосистем под руководством Л. С. Гуткина, занимающаяся общими вопросами теории и практики радиосистем, систем радиоуправления и радионавигации. Серьезные научные и практические результаты в области новой антенной техники на телах вращения, в радиоастрономии, в области разнообразных устройств СВЧ, а также в вопросах распространения радиоволн в сложных средах, включающих плазменные зоны, получены за многие годы на кафедре антенных устройств и распространения радиоволн, которую в свое время возглавляли профессоры Г. Т. Марков и Е. Н. Васильев. Практически всеми вопросами конструирования и инженерных решений при проектировании радиоустройств занималась кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры (в 1995 г. была присоединена к кафедре радиоприемных устройств).

В конце 1980-х гг. радиофакультет МЭИ был открыт для приема иностранных студентов и аспирантов, и существенной стала международная активность факультета. Активно шла подготовка кадров высшей квалификации для Китая, Болгарии, Чехословакии, Восточной Германии. Сейчас среди партнеров факультета университеты и организации Франции, Велико-



Стенд для исследования зоны, существенной для распространения радиоволн

британии, США, Сирии, Южной Кореи, Китая и стран, бывших республик СССР. Выпускники РТФ востребованы за рубежом, что подтверждает высокий уровень их профессиональной подготовки. Научные книги, подготовленные сотрудниками МЭИ, издаются в США и Великобритании, получая прекрасные отзывы специалистов.

В 2002 году в ходе проводившейся реструктуризации МЭИ был образован Институт радиотехники и электроники (ИРЭ), в состав которого вошло два факультета — радиотехнический и факультет электронной техники. В 2006 году ИРЭ МЭИ, одновременно с ИРЭ РАН, было присвоено имя академика В. А. Котельникова.

Профессорско-преподавательский коллектив РТФ активно совершенствует учебный процесс — разрабатывает учебно-методические комплексы для перспективной дистанционной формы обучения, предлагает новые курсы лекций, позволяющие будущим специалистам познакомиться с новой элементной базой, изучить современные технологии: информационно-телекоммуникационные, радиочастотной идентификации, охранную и др., а также овладеть современными методами моделирования и проектирования радиоэлектронных систем и устройств на основе САПР.

Как известно, развитие учебного процесса во многом определяется активным участием профессорско-преподавательского состава и научных сотрудников в научно-исследовательских работах. Основная тематика научных исследований на радиофакультете в настоящее время — это спутниковые радионавигационные системы, адаптивные радиосистемы, высокоскоростные методы передачи данных, высокоточ-



В лаборатории для изучения отражения радиолокационных целей кафедры Радиотехнических приборов

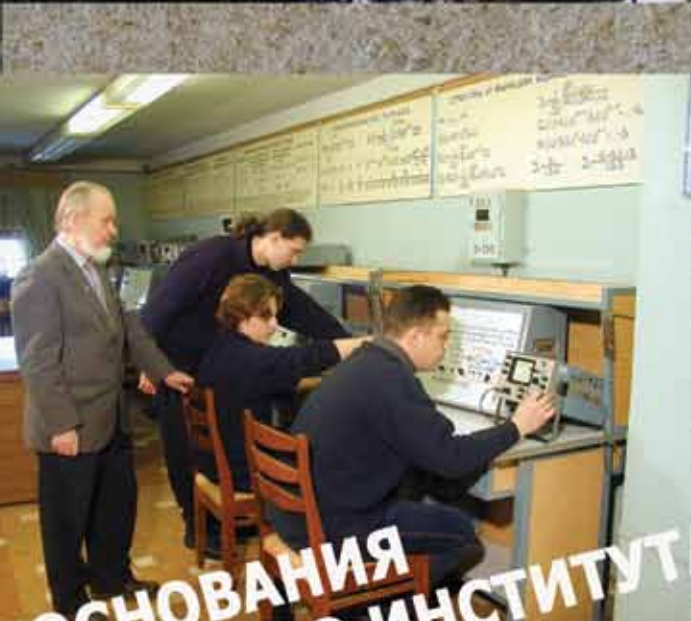
ные системы наведения, антенные комплексы наземного, космического и морского базирования, специализированные радиоэлектронные устройства, исследования в области применения теории динамического хаоса в нелинейных системах для формирования и обработки сложных сигналов в приборах нового класса и использования их для создания каналов связи с высокой помехозащищенностью, исследования методов обработки сигналов аппаратуры широкого назначения, в том числе для медицинской диагностики.

На факультете также проводятся научные и прикладные исследования в области конверсионных технологий, в частности, для решения задач, актуальных для современной энергетики. Методы ближней радиолокации, разрабатывавшиеся в течение многих лет, воплощены в разработках промышленных уровнемеров, неконтактных измерителей скорости, вибрации, приборов дистанционного контроля физиологических параметров человека. Разработаны локальные системы для беспроводного экологического и технологического мониторинга промышленных объектов, в том числе энергетических.

В заключение отметим, что перспективные планы и университета в целом, и его институтов направлены на дальнейшее совершенствование образовательной деятельности, а также на решение задач, которые ставят современные наука и техника. МЭИ был, есть и, мы уверены, будет одним из крупнейших университетов страны — учебным и научно-исследовательским центром, готовящим высококвалифицированные кадры для промышленности, науки, экономики и культуры.

МЭИ

Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова



**80 ЛЕТ СО ДНЯ ОСНОВАНИЯ
МОСКОВСКОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА**



Министерство промышленной политики Украины
Государственное предприятие

НИИ «Орион»



**Кремниевые быстродействующие переключа-
тельные $p-i-n$ -диоды миллиметрового
диапазона в бескорпусном исполнении
с балочными выводами**

Наименование параметра	Значения для диодов с толщиной базы, мкм			
	2,5 – 3,0	3,5 – 4,0	5,5 – 6,0	9 – 10
Пробивное напряжение, В	50 – 60	70 – 80	100 – 120	180 – 200
Прямое сопротивление, Ом ($I = 10$ мА)	0,6 – 0,7	1,1 – 1,4	1,8 – 2,2	3,0 – 3,5
Прямое сопротивление, Ом ($I = 5$ мА)	0,8 – 1,1	1,5 – 1,8	2,0 – 2,3	3,5 – 4,0
Емкость диода, пФ ($U_{обр} = 10$ В)	0,12 – 0,14	0,06 – 0,07	0,035 – 0,04	0,03
Время восстановления, нс ($I = 10$ мА, $U_{обр} = 10$ В)	3,5 – 4,0	6,5 – 7,0	9 – 11	24 – 27

Диоды изготовлены по мембранной технологии, применяются в управляющих СВЧ-компонентах (модуляторах, фазовращателях), выполненных на основе микрополосковых и волноводно-щелевых линий передач, на частотах до 100 ГГц.

В процессе изготовления диодов используются структуры $p-p^+$ -типа с высокоомным эпитаксиальным слоем толщиной 2—10 мкм, который формируется на высоколегированной кремниевой подложке с удельным сопротивлением 0,0015—0,0020 Ом·см и ориентацией [111] методом газовой фазной эпитаксии с использованием $SiCl_4$. Удельное сопротивление структур составляет 20—100 Ом·см.

**Высокоэффективные
GaAs-диоды Ганна
непрерывного режима**

Обозначение	УАА 701	УАА 702
Частотный диапазон, ГГц	41 – 43	30 – 37,5
Выходная мощность, мВт	0,5 – 1	50 – 100
Рабочее напряжение, В	4,0	5,5
Рабочий ток, А	0,12	0,5 – 1,0



Предназначены для использования в качестве активных элементов высокостабильных источников электромагнитных колебаний в составе аппаратуры и систем радиолокации, навигации и связи различного назначения.

Украина, 03680, г. Киев-057, ул. Э. Потьма, 8а
Тел.: (044) 456-9164; Факс: (044) 456-5291; orion@ri-orion.kiev.ua



Номер готовили
Баку, Киев, Львов, Минск, Москва,
Одесса, С.-Петербург, Харьков,
Черновцы.



Пишите
Подписывайтесь
Читайте

2(86) 2010