

**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;
- сенсорелектроника;
- 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 катодолінофосцентных 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. Угрін, С. В. Бобженко.— 2009.— Бюл. № 7.
9. Ткаченко В. В., Іжко Н. С., Угрін 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 теплоотводу // 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 кута повороту генераторного типу з елементом на поверхневих акустичних хвилях // 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, Т. В. Коростинська та ін.
23. Патент 43386 України. Апаратура для діагностики надійності напівпровідникових надпотужних і імпульсних лавинно-пролітних 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 приладів 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. Вірозув, 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.

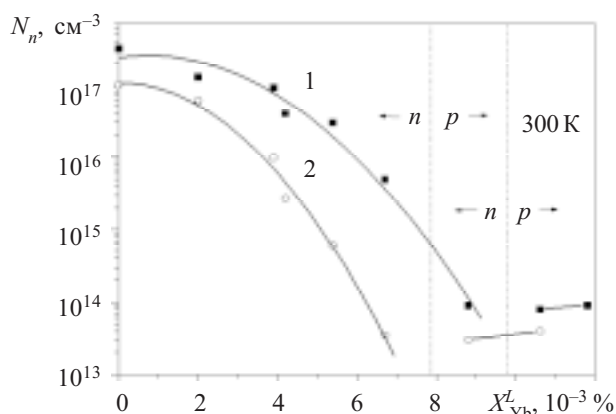


Рис. 1. Зависимость концентрации носителей заряда в эпитаксиальных слоях $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ от атомной доли Yb в расплаве индия:

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—550°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 $n\text{GaAs}-p\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0,2-0,3$) с концентрацией основных носителей $(3-5) \cdot 10^{17}$ и $(1-2) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, соответственно. На втором этапе в интервале температур 750—680°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

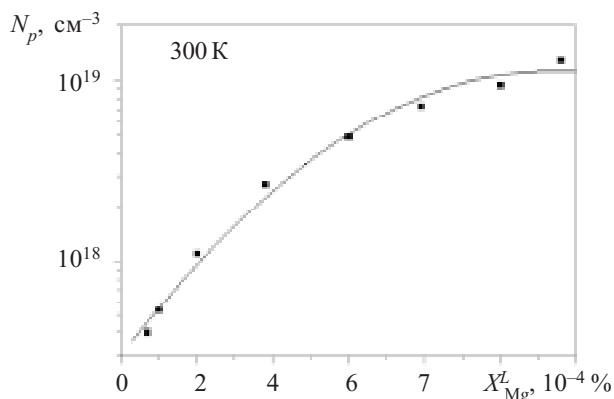


Рис. 2. Зависимость концентрации дырок в эпитаксиальных слоях $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ от атомной доли Mg в растворе-расплаве галлия при фиксированных оптимальных концентрациях $N_{\text{Yb}}^L = 9 \cdot 10^{-3} \%$ и $N_{\text{Al}}^L = 1 \cdot 10^{-3} \%$

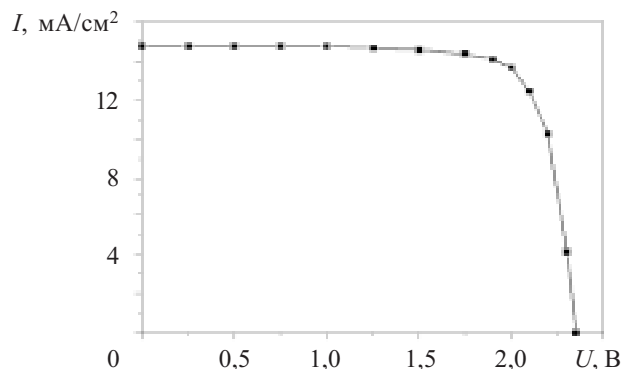


Рис. 3. Типичная вольт-амперная характеристика фотоэлектрического преобразователя на основе тандемной гетероструктуры GaAs(AlGaAs)/InGaP при спектральных условиях AM 1,5

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.

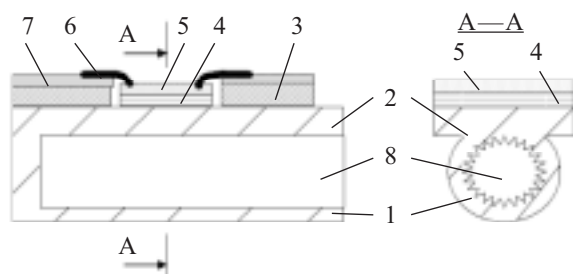


Рис. 4. Схема монтажа кристалла фотоэлектрического преобразователя на тепловой трубе:

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

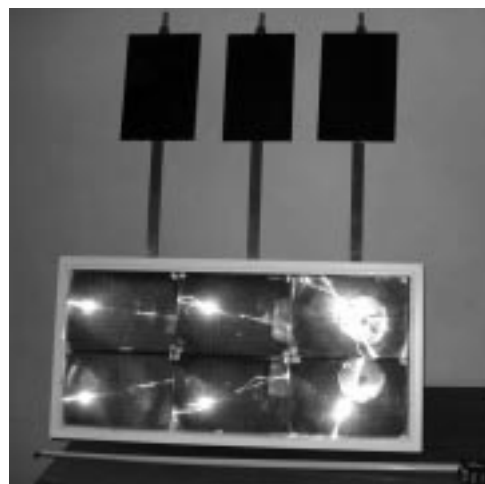


Рис. 5. Модуль солнечной батареи с концентратором на основе линз Френеля и теплоотводом на основе тепловых труб, снабженных радиаторными пластинами

Кристалл фотоэлектрического преобразователя с помощью прижимного пружинного контакта фиксировался на тепловой трубе. Для обеспечения надежного электрического и теплового контакта тыльной стороны кристалла с тепловой трубой 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).

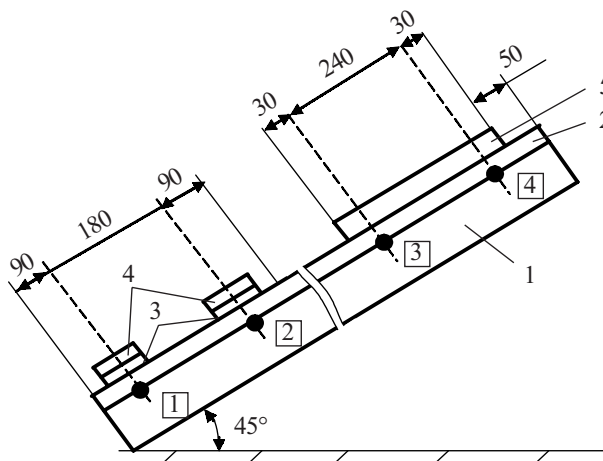


Рис. 6. Схема расположения точек измерения температуры на тепловой трубе:

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-

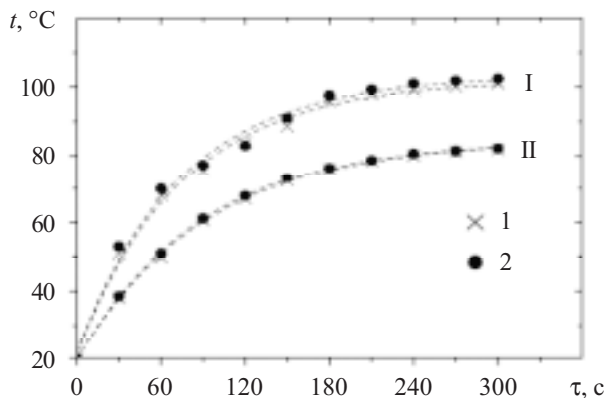


Рис. 7. Изменение во времени τ температуры t на тепловой трубе без радиатора (I) и с радиатором (II) в зоне размещения фотопреобразователей (точки 1 и 2 на рис. 6)

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

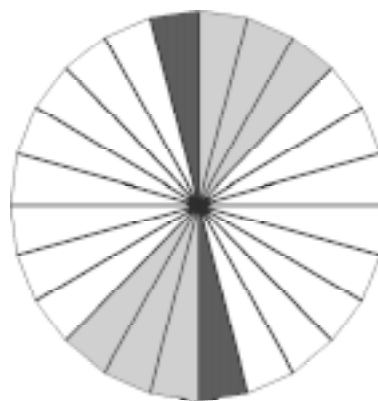


Рис. 1. Кластер, состоящий из четырех бисекторов (головной бисектор — более темный)

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.

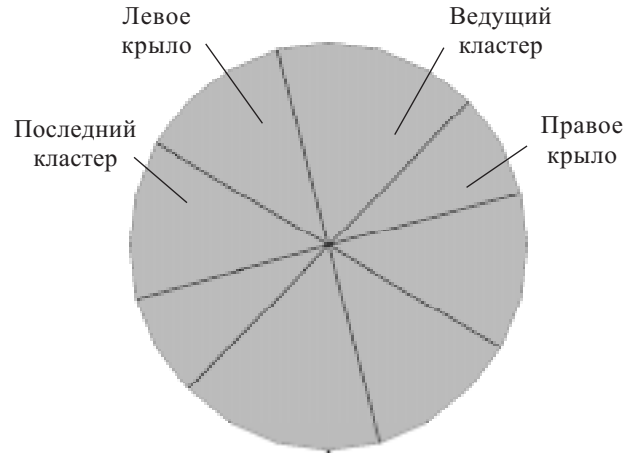


Рис. 2. Разбиение круга на четыре кластера

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,

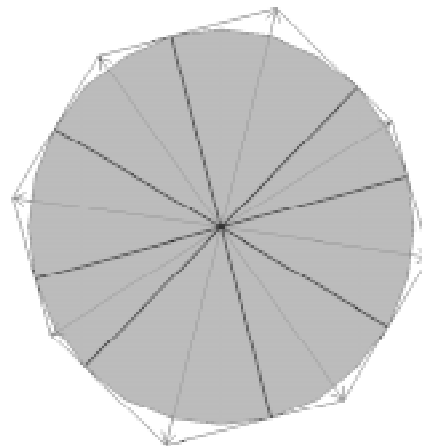


Рис. 3. Директоры

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

Работа выполнена при поддержке Фонда гражданских исследований и развития США (CRDF) (проект № UKE2-2958-KH-08).

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.

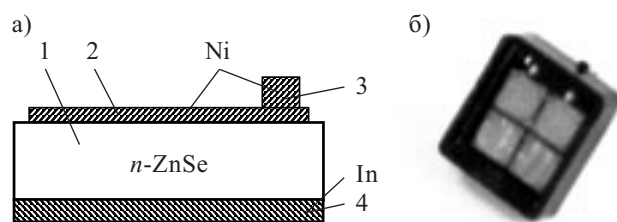


Рис. 1. Схематическое изображение (а) и внешний вид (б) УФ-фотодиода на основе ZnSe:

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 структурой

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

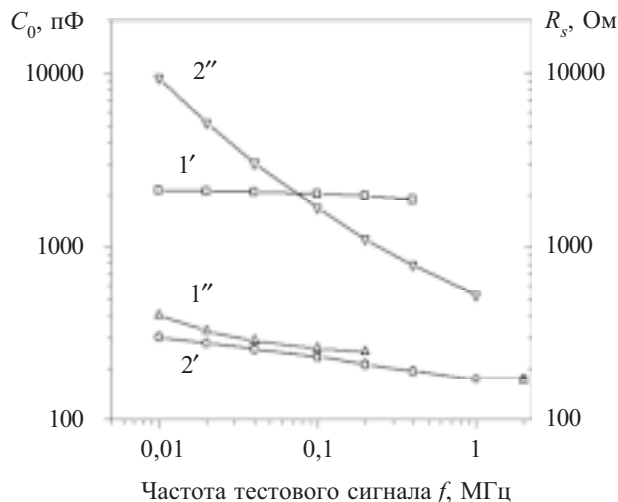


Рис. 3. Зависимость емкости C_0 (1', 2') и последовательного сопротивления R_s (1'', 2'') для двух образцов УФ-фотоприемника от частоты f . Напряжение на фотодиоде $U=0$ В

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

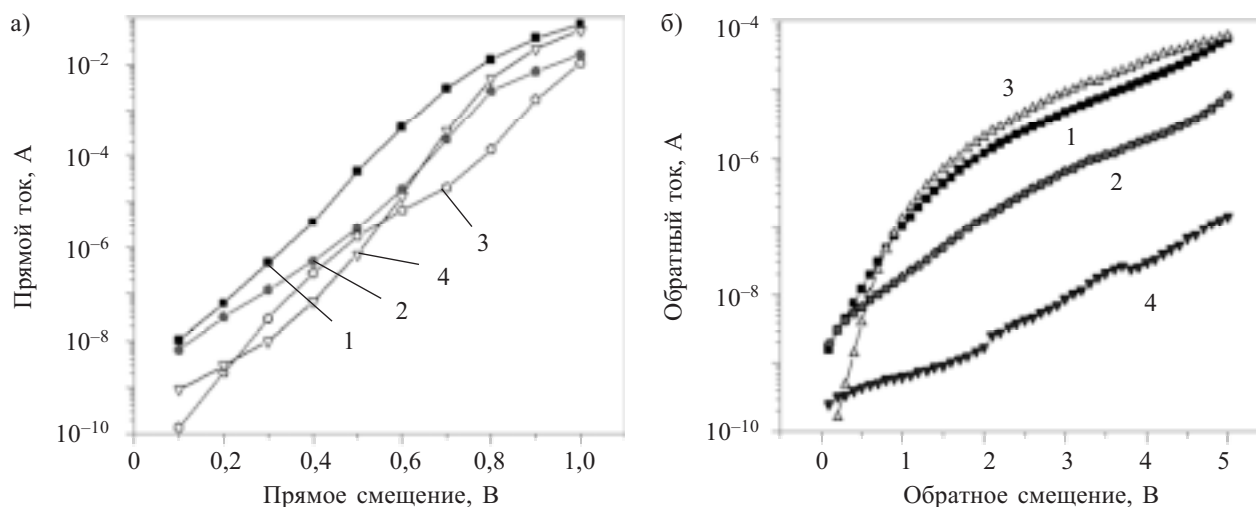


Рис. 2. Прямые (а) и обратные (б) ветви вольт-амперных характеристик четырех образцов УФ-фотоприемников на ZnSe(Te)

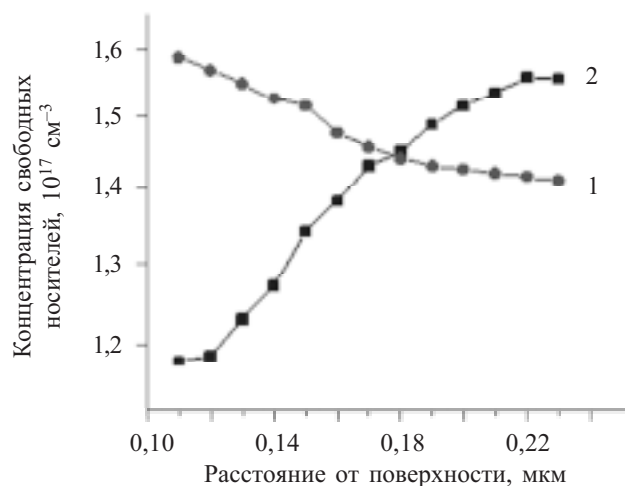


Рис. 4. Профили распределения концентрации свободных носителей заряда в приповерхностной области ZnSe под барьерным электродом для двух образцов УФ-фотодиодов (см. рис. 2)

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

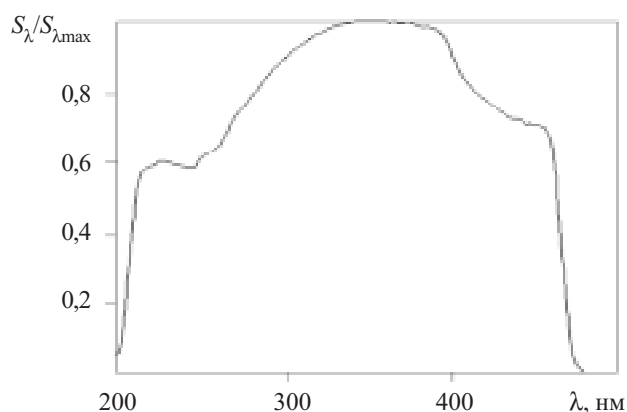


Рис. 5. Усредненная типичная спектральная характеристика УФ-фотодиодов на основе барьеров Шоттки Ni–ZnSe(Te)–In.

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>

К. т. н. А. А. ЕФИМЕНКО, А. И. ВИЛЬЧИНСКИЙ

Украина, Одесский национальный политехнический университет
E-mail: tkea@optima.com.ua

Дата поступления в редакцию
21.12 2009 г.

Оппонент д. т. н. И. Ш. НЕВЛЮДОВ
(ХНУРЭ, г. Харьков)

ОПТИМАЛЬНЫЙ ВЫБОР СТАНДАРТНЫХ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Предложены модели и алгоритмы выбора стандартных несущих конструкций, позволяющие оптимизировать процесс разработки электронных средств.

Несущие конструкции (НК) во многом определяют конструкцию электронных средств (ЭС), их качественные и количественные показатели, следовательно требуют эффективного применения.

В современных условиях, когда НК являются, по существу, стандартными компонентами, поставляемыми по каталогам, существует возможность выбора НК различных типов и размеров, в том числе и разработок различных фирм. Поэтому если говорить об оптимальной разработке конструкции ЭС, то следует иметь в виду, что существует проблема выбора оптимальной НК — наилучшей для разрабатываемого ЭС как по экономическим, так и по техническим показателям. В то же время, качество и сложность самого разрабатываемого ЭС зависит от используемой НК. Таким образом, необходимо оценивать не только выбранную НК, но и проект реализованного на ее основе ЭС.

В большинстве работ, посвященных НК, содержатся вопросы их синтеза и конструирования [1—5]. Однако на современном этапе развития электронных

технологий для многих отраслей промышленности более насущной стала задача оптимального выбора стандартной НК в силу очень высокого уровня международной стандартизации в части механических структур для электронного оборудования (организация по стандартизации — Международная электротехническая комиссия МЭК (IEC)) и развитого специализированного производства НК в мировых масштабах (наиболее известные фирмы-производители — Schroff и Rittal).

В настоящее время выбор варианта НК осуществляется, как правило, по каталогам путем изучения характеристик НК и сопоставления их с требованиями к разрабатываемому ЭС. Результаты выбора во многом зависят от опыта и осведомленности разработчика и не всегда являются оптимальными с точки зрения получения наилучших технико-экономических характеристик разрабатываемого изделия. В связи с этим, можно утверждать, что решение задачи оптимального выбора НК является актуальным.

Целью настоящей работы было создание моделей и алгоритмов для оптимального выбора стандартных НК при разработке ЭС.

Углубленную схему разработки ЭС можно представить следующим образом (рис. 1) [6].

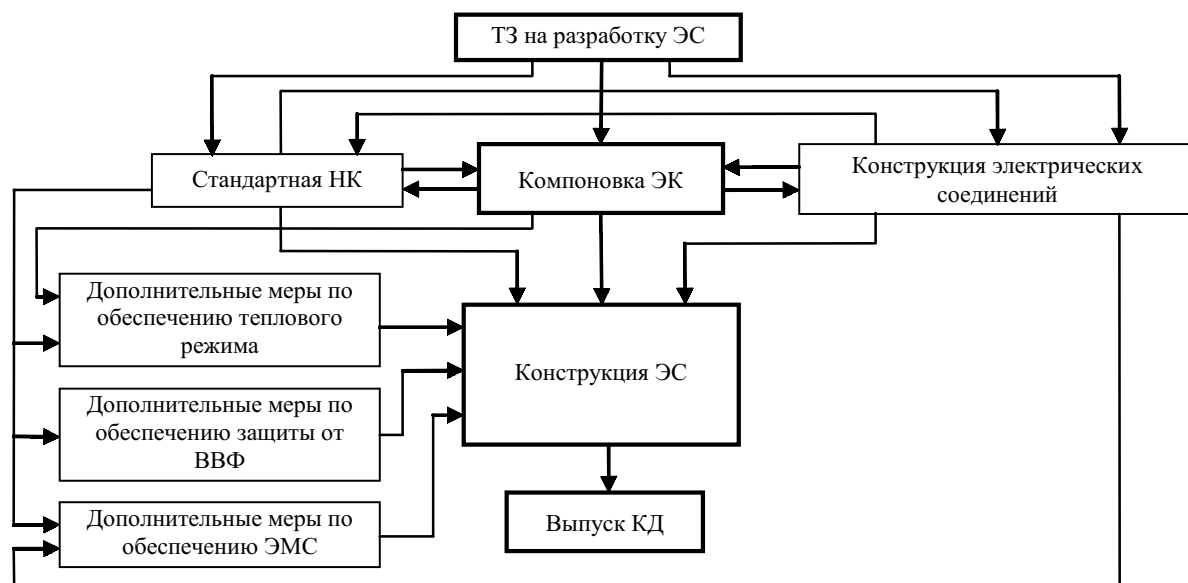


Рис. 1. Схема разработки ЭС

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 $N_{\text{сб}}$ — число элементов НК, $N_{\text{э}}^*$ — 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.

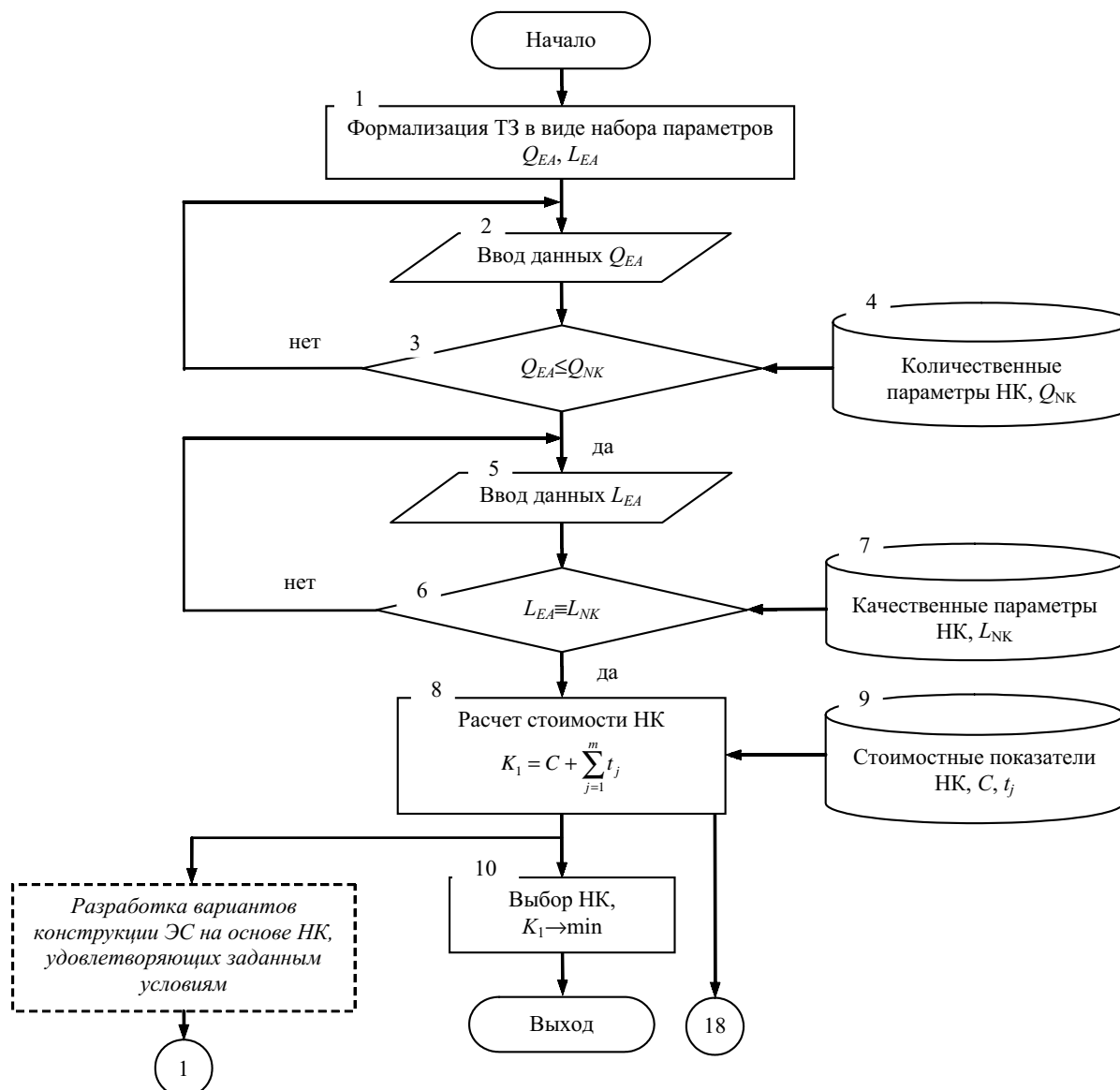


Рис. 2. Алгоритм выбора НК по показателю ее стоимости

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.

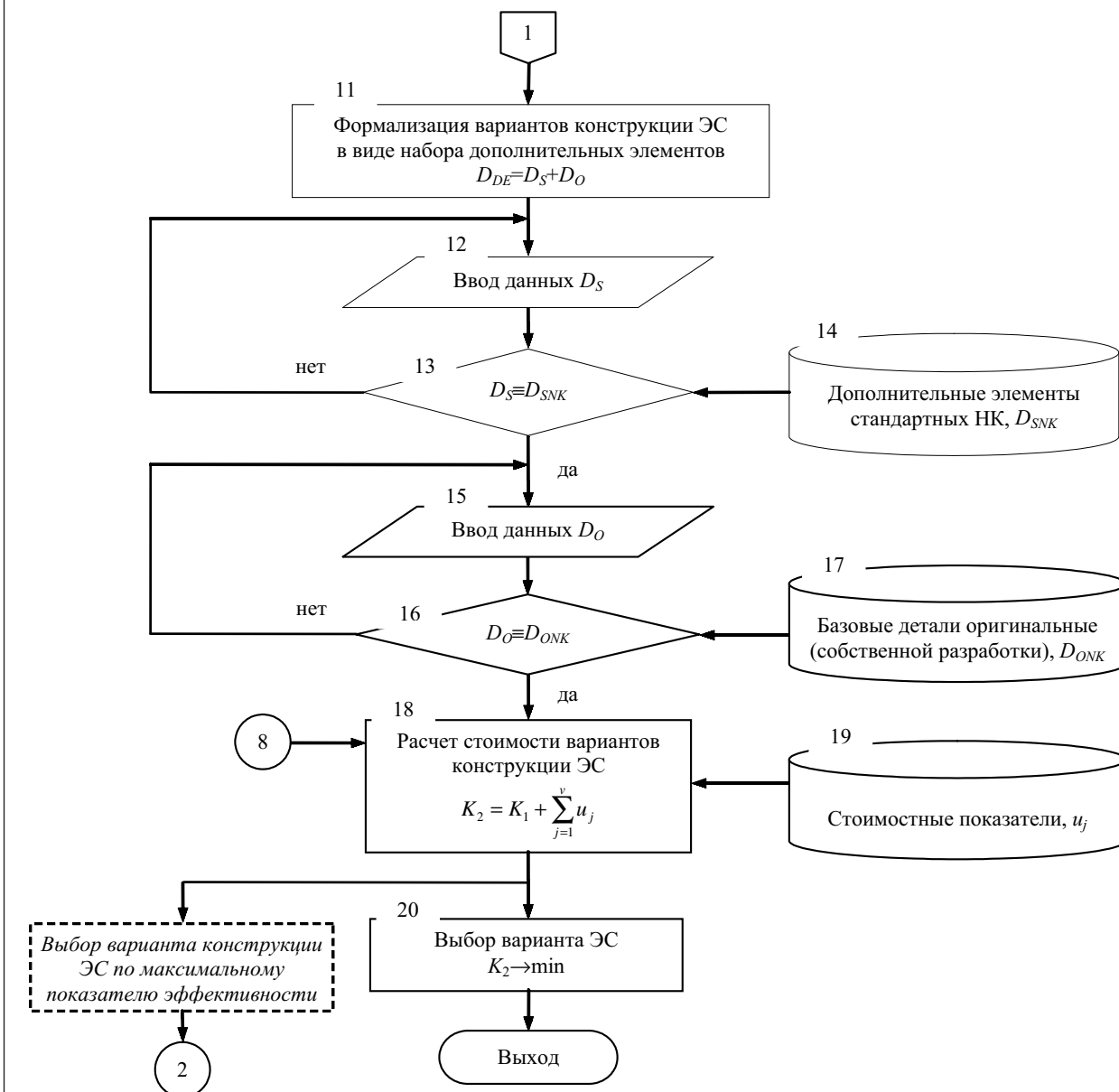


Рис. 3. Алгоритм выбора НК по показателям стоимости ЭС (продолжение рис. 2)

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.

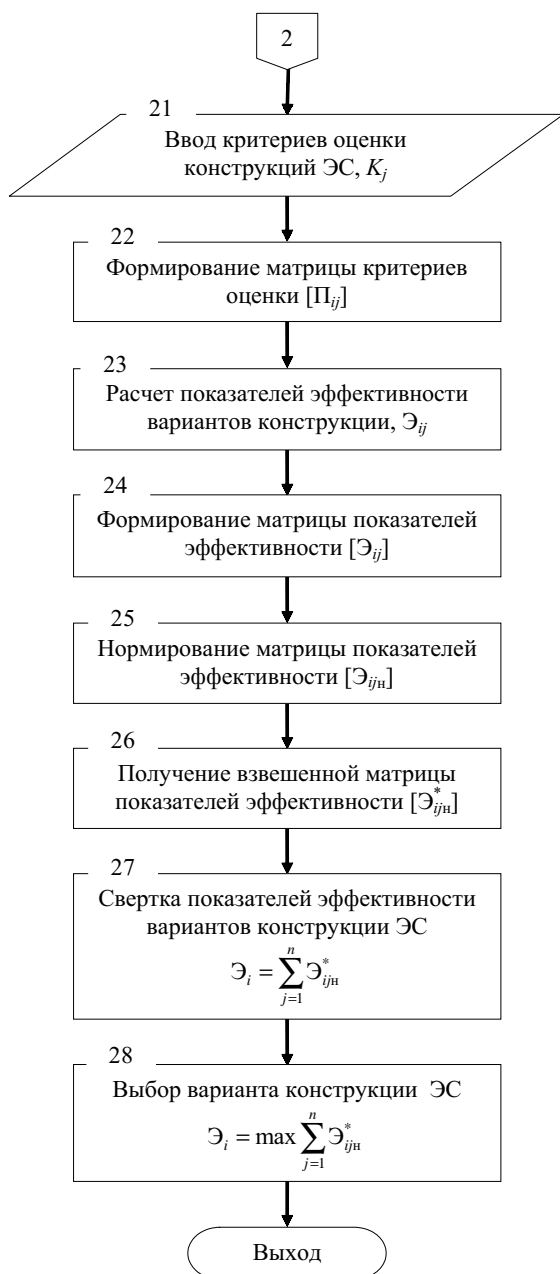


Рис. 4. Алгоритм выбора НК по показателям эффективности ЭС (продолжение рис. 2 и 3)

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 Междуна. 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.