

Технология и конструирование в электронной аппаратуре

К статье «Школа
А. И. Иоффе
как пример
единства науки,
образования
и производства»



Национальный научный
центр «Харьковский
Физико-технический
институт»



Физико-технический
институт
имени А. Ф. Иоффе,
г. Санкт-Петербург

1(67) 2007

ЯНВАРЬ — ФЕВРАЛЬ

**ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2007 № 1 (67)

Год издания 31-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. Дашковский (г. Киев)
Д.т.н. Л. С. Лутченков (г. С.-Петербург)
Д.т.н. В. П. Малахов (г. Одесса)
Д.ф.-м.н. В. Ф. Мачулин (г. Киев)
В. А. Мингалёв (г. Одесса)
В. А. Проценко (г. Киев)
Е. А. Тихонова (г. Одесса)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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)
Л. М. Лейдерман (г. Одесса)
Д.т.н. С. Ю. Лузин (г. С.-Петербург)
К.т.н. И. Л. Михеева (г. Киев)
К.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. П. В. Серба (г. Таганрог)
Д.х.н. В. Н. Томашик (г. Киев)
Д.ф.-м.н. О. И. Шпотюк (г. Львов)

УЧРЕДИТЕЛИ

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

Техническая политика

Сценарии организации цифровых трактов для ВЧ-связи по высоко-
вольтным линиям электропередачи. *Курицын Е. М., Пантелеев В. В.* 3

Электронные средства: исследования, разработки

Эволюционное моделирование как метод решения задач оптималь-
ного проектирования несущих конструкций РЭС. *Бырка Р. В.* 13

Моделирование зонда с запирающим потенциалом в проектирова-
нии устройств телеметрии и управления. *Николаенко В. М., Нико-
лаенко О. В., Венедиктов А. Ю.* 18

Техника сверхвысоких частот

Входное устройство для РЛС с защитой от мощного сигнала. *Яковлев
И. В., Демьяненко Ю. А., Санкин В. А., Чижда Н. М.* 23

Биомедицинская электроника

Тестер терапевта. *Скубилин М. Д.* 25

Сенсоэлектроника

Моделирование энергетической зависимости чувствительности
CdTe (CdZnTe) детекторов гамма-излучения. *Захарченко А. А., На-
конечный Д. В., Шляхов И. Н., Рыбка А. В., Кутний В. Е., Хажмура-
дов М. А.* 28

Функциональная микро- и нанoeлектроника

Воздействие импульсов прямого тока на время жизни неосновных
носителей заряда в p^+-n -диоде. *Куширенико В. В., [Хинидзе Г. К.],
Павлюк С. П., Савицкий С. М., Третьак О. В.* 32

Зависимость сопротивления металлических квантовых проводов от
температуры. *Обухов И. А.* 36

Анизотропная термоэлектрическая матрица для регистрации излу-
чения. *Ащеулов А. А.* 40

Технологические процессы и оборудование

Получение поверхностно-барьерных структур на основе четырех-
компонентных твердых растворов A^4B^6 . *Ткачук А. И., Царенко О. Н.,
Рябец С. И., Ткачук И. Ю., Ковалёв Ю. Г.* 42

Технологии изготовления фотонных кристаллов. *Березянский Б. М.* 45

Метрология. Стандартизация

Опыт применения европейского стандарта PSS-49 при разработке
тепловых труб для терморегулирования микроспутника Bird. *Ба-
туркин В. М.* 52

К истории науки и техники

Школа А. Ф. Иоффе как пример единства науки, образования и про-
изводства. *Усанов Д. А.* 59

Библиография

Указатель статей, опубликованных в 2006 г. 62

Новые книги 22, 31, 35, 39, 44, 51, 58

В портфеле редакции 17, 64

Выставки. Конференции 27, 41, 44, 51, 2-я и 4-я стр. обл.

ЗМІСТ

Технічна політика

Сценарії організації цифрових трактів для ВЧ-зв'язку по високовольтних лініях електропередачі. *Курицин Є. М., Пантелєєв В. В.* (3)

Електронні засоби: дослідження, розробки

Еволюційне моделювання як метод рішення задач оптимального проектування несучих конструкцій РЕЗ. *Бирка Р. В.* (13)
Моделювання зонда з запираючим потенціалом в проектуванні приладів телеметрії та керування. *Ніколаєнко В. М., Ніколаєнко О. В., Венедиктов О. Ю.* (18)

Техніка надвисоких частот

Вхідний прилад для РЛС з захистом від потужного сигналу. *Яковлев І. В., Дем'яненко Ю. О., Санкін В. О., Чижма М. М.* (23)

Біомедицинська електроніка

Тестер терапевта. *Скубілін М. Д.* (25)

Сенсоелектроніка

Моделювання енергетичної залежності чутливості CdTe (CdZnTe) детекторів гамма-випромінювання. *Захарченко О. А., Наконечний Д. В., Шляхов І. М., Рибка О. В., Кутній В. Є., Хажмуратов М. А.* (28)

Функціональна мікро- та наноелектроніка

Вплив імпульсів прямого струму на час життя неосновних носіїв заряду у p^+-n -діоді. *Кушніренко В. В., Нінідзе Г. К., Павлюк С. П., Савицький С. М., Третяк О. В.* (32)

Залежність опору металевих квантових дротів від температури. *Обухов І. А.* (36)

Анізотропна термоелектрична матриця для реєстрації випромінювання. *Айцеулов А. А.* (40)

Технологічні процеси та обладнання

Отримання поверхнево-бар'єрних структур на основі чотирьохкомпонентних твердих розчинів A^4B^6 . *Ткачук А. І., Царенко О. М., Рябець С. І., Ткачук І. Ю., Ковальов Ю. Г.* (42)

Технології виготовлення фотонних кристалів. *Березянський Б. М.* (45)

Метрологія. Стандартизація

Досвід застосування європейського стандарту PSS-49 при розробці теплових труб для терморегулювання мікросупутника Bird. *Батуркин В. М.* (52)

До історії науки і техніки

Школа А. Ф. Іоффе як приклад єдності науки, освіти та виробництва. *Усанов Д. О.* (59)

CONTENT

Technical polytic

Scenarios of the building digital PLC-communications paths over high voltage power line. *Kuricyn E. M., Panteleev V. V.* (3)

Electronic means: investigations, development

Evolutional model operation as problem-solving procedure of optimal design of load carrying constructions radioelectronic devices. *Byrka R. V.* (13)

Retarding potential analyzer in telemetrical and control devices design. *Nikolayenko V. M., Nikolayenko O. B., Venediktov A. Yu.* (18)

Engineering of superhigh frequencies

Input device for RLS with protection from powerful signal. *Yakovlev I. V., Demyanenko Yu. A., Sankin V. A., Chizma N. M.* (23)

Biomedical electronics

Therapeutic tester. *Scubilin M. D.* (25)

Sensoelectronics

Simulation of energy dependence of CdTe (CdZnTe) gamma-radiation detectors sensitivity. *Zakharchenko A. A., Nakonechny D. V., Shlyakhov I. N., Rybka A. V., Kutny V. E., Khazhmuradov M. A.* (28)

Functional micro- and nanoelectronics

Influence of pulses of a direct current on time of life of the not basic carriers of a charge in p^+-n -diode. *Kushnirenko V. V., Ninidze G. K., Pavljuk S. P., Savitsky S. M., Tretyak O. V.* (32)

Dependence of metal quantum wires's resistance from temperature. *Obukhov I. A.* (36)

Anisotropic thermoelectric array for registration of radiation. *Ashcheulov A. A.* (40)

Technological processes and equipment

The obtaining of barrier-surface structures on the base of A^4B^6 quaternary solid solutions. *Tkachuk A. I., Tsarenko O. N., Raybets S. I., Tkachuk I. Yu., Kovalyov Yu. G.* (42)

Technologies of the fabrication of photonic crystals. *Berezianskyi B. M.* (45)

Metrology. Standartization

Experience of application of the European standart PSS-49 at the development of heat pipes for thermal control of BIRD microsatellite. *Baturkin V. M.* (52)

To a history of science and engineering

Ioffe school as an example of realization of science, education and industry unity. *Usanov D. A.* (59)

К. т. н. Е. М. КУРИЦЫН, к. т. н. В. В. ПАНТЕЛЕЕВ

Дата поступления в редакцию
13.06 2006 г.Украина, г. Одесса, ООО "Южная энергетическая компания"
E-mail: uek@te.net.uaОппонент О. П. БАСЮК
(г. Одесса)

СЦЕНАРИИ ОРГАНИЗАЦИИ ЦИФРОВЫХ ТРАКТОВ ДЛЯ ВЧ-СВЯЗИ ПО ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ ЛИНИЯМ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Рассматриваются сценарии построения единой высокоскоростной сети доступа с интеграцией служб на высоковольтных линиях электропередачи.

Общие положения

Интенсивное развитие телекоммуникационных технологий цифровой передачи и коммутации, а также компьютерных технологий, привели к изменению характера трафика и запросов пользователей к качеству и разнообразию предоставляемых услуг служб электросвязи [1, 2]. Традиционные границы между различными службами (телефония, тональное и надтональное телеграфирование, телекс, передача факсимильных сообщений и данных, конференцсвязь, видео и пр.) в настоящее время становятся все более расплывчатыми. В свою очередь, взрывной рост числа пользователей Интернет и бурное внедрение микросетевых сетей для мобильной связи абонентов на территории предприятия в соответствии с европейскими либо международными стандартами (**DECT** — Digital Enhanced Cordless Telephone) потребовал обеспечения доступа и к широкополосным услугам на любых иерархических уровнях — от основного цифрового канала (**ОЦК DS-0** (Digital Signal 0-level, скорость передачи $B^{DS0}=64$ кбит/с), канала узкополосной цифровой сети с интеграцией служб (**N-ISDN** — Narrow-Integrated Services Digital Network) с базовым доступом интерфейса **ISDN-BRA** (Base Rate Access, скорость передачи $2 \times B^{DS0} + D_{16} = 144$ кбит/с) вплоть до трибутарных усеченного первичного FE-1 ($B^{FE1}=64$ кбит/с $\times N_{TS}$) и/или первичного E-1 ($B^{E1}=2,048$ Мбит/с) цифровых каналов/трактов.

Построение единой высокоскоростной **сети доступа с интеграцией служб ISAN** (Integrated Services Access Network) позволяет создать такую гибкую телекоммуникационную сеть, обеспечивающую предоставление всевозможных и основанных на разных технологиях услуг [3]. Эта сеть способна единым образом транспортировать все виды информационных сообщений с распределением своих сетевых ресурсов оптимальным образом, обеспечивая: гибкость и адаптацию к изменению уровня требований пользователей по объему, скорости и качеству доставки информации; повышение эффективности использования имеющихся транспортных ресурсов путем их утилизации — вторичного использования; сни-

жение общих затрат на проектирование, строительство, техническую эксплуатацию и обслуживание телекоммуникационной подсистемы. При этом образование транспорта интегрированной сети доступа ISAN будет заключаться в организации трактов передачи общих носителей между различными узлами в телекоммуникационной сети и адаптации к используемым средам передачи [4, 5].

Для оптимального построения интегрированной сети доступа на физическом уровне модели взаимодействия открытых систем **OSI** (Open Systems Interconnection) технологически целесообразно применить новый класс аппаратуры цифрового уплотнения каналов, названной **гибкими мультиплексорами FLEX MUX** [4]. Данные мультиплексоры доступа способны реализовать различные услуги служб электросвязи и конструктивно размещены в едином субблоке. Стоимость такого класса аппаратуры значительно ниже, чем стоимость разнообразного многоаппаратного оборудования с теми же возможностями. Техническое обслуживание аппаратуры гибкого мультиплексирования производится с помощью единой системы управления **EMS** (Element Management System) по простейшим сетевым **SNMP** (Simple Network Management Protocol) протоколам, а модульный принцип построения позволяет наращивать возможности аппаратуры с ростом потребностей пользователей, обеспечивая тем самым долговременную защиту инвестиций. Кроме того, гибкие мультиплексоры FLEX MUX позволяют решить такие проблемы транспортных функций интегрированного доступа как: функции мультиплексирования; функции кроссовой коммутации, включая установление соединений по требованию и конфигурацию кроссовых соединений; функции управления; функции физических сред.

Обобщенный сценарий построения сети доступа с интеграцией служб ISAN на существующей корпоративной сети электросвязи Национальной энергетической компании «Укрэнерго» с применением гибких мультиплексоров FLEX MUX приведен на **рис. 1** [6].

Однако сложившаяся структура построения корпоративной сети связи энергопредприятий является в основном аналоговой [7—9]. Здесь долгие годы и успешно используются аналоговые кабельные и радиорелейные системы передачи (**АСП**). Поэтому на данном этапе построения интегрированной сети доступа ISAN, организации выделенных цифровых зон

и локальных цифровых сетей целесообразно широко использовать весь парк АСП на тех направлениях, где переоборудование на цифровые системы передачи (ЦСП) или их строительство на основе волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) нецелесообразно по технико-экономическим или иным соображениям [2, 5]. Действительно, при кольцевом построении транспортной цифровой сети с применением ВОЛС всегда будут существовать так называемые “тупиковые” ответвления от основных “хребтовых” магистралей, где потребность в высокоскоростном трафике незначительна. Возможное же увеличение цифрового трафика на “тупиковых” направлениях в будущем, через 10—15 лет, потребует безусловной замены оптического кабеля из-за его, как показал зарубежный опыт [10], “помутнения” — физического старения оптических волокон.

К сказанному следует добавить, что построение такой “наложенной” цифровой сети интегрированного доступа ISAN на существующую аналоговую первичную сеть электросвязи даст 100%-ное резервирование цифровых каналов приоритетным пользователям строящихся высокоскоростных сетей на основе синхронной цифровой иерархии SDH (Synchronous Digital Hierarchy) с асинхронными режимами доставки сообщений от FR (Frame Relay), ATM (Asynchronous Transfer Mode) до IP (Internet Protocol).

Для организации цифровых каналов в линейных трактах проводных и радиорелейных АСП возможно использование устройств преобразования сигналов (УПС) — широкополосных высокоскоростных модемов, предназначенных для преобразования цифрового сигнала в форму, “удобную” для передачи по данной среде распространения [11, 12]. Такие устройства могут работать в основной полосе цифрового сигнала DS0 по плезихронной иерархии PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy) скоростей передачи триба Е/Т непосредственно [2, 13] либо с использованием несущего колебания [1, 14]. В первом случае “цифровые” УПС (DSU/CSU-модемы) нашли применение на физических цепях абонентских и соединительных линий городских телефонных сетей (ГТС), где обеспечение требуемой дальности связи достигается как оптимальным выбором типа линейного сигнала (например, линейные AMI, 2B1Q и блочные 4B3T, 3B2T коды или манипуляции CAP-N, DMT, TC-RAM), так и эхо-компенсационным либо временным методами организации двухсторонней дуплексной связи.

DSU/CSU-модемы (Data Service Unit/Channel Service Units) в основной полосе частот цифрового сигнала DS1 (например, первого иерархического уровня PDH для трибутарного потока Е1/Т1) используют хорошо себя зарекомендовавшие разнообразные технологии xDSL (“x”-any bit rate Digital Subscriber Line) цифровых абонентских линий (ЦАЛ). Из этих технологий, которые позволяют в единицы-десятки мегабит использовать возможности существующей сегодня “последней мили”, наиболее известны: высокоскоростные ВЦАЛ — HDSL (High-bit-rate DSL), симметричные СЦАЛ — SDSL (Symmetrical DSL), асимметричные АсЦАЛ — ADSL (Asymmetrical

DSL), адаптируемые по скорости АЦАЛ — RADSL (Rate Adaptive DSL) и сверхвысокоскоростные СвЦАЛ — VDSL (Very-high-rate DSL) цифровые абонентские линии ЦАЛ [15—17].

В другом случае, при использовании несущего колебания, УПС как “аналоговые” DTE/DCE-модемы (Data Terminal Equipment/Data Circuit-termination Equipment) работают по полосно-ограниченным стандартным широкополосным каналам и групповым трактам АСП [1]. Для высоковольтных линий электропередачи (ВЛЭП) каналы и тракты [8] могут быть образованы, в частности, на базе аппаратуры каналов связи и телемеханики (АКСТ) модели «ЛИНИЯ-М-ПУ-ПК» [18], формирующей стандартные каналы тональной частоты (ТЧ) либо группы каналов ТЧ в стандартизованной [19] полосе частот 20 кГц... 1 МГц. Кроме того, рассматриваемый класс модемов так же эффективно работает по аналоговым линейным трактам (АЛТ) проводных (ПСП) и стволам передачи радиорелейных (РРСР) систем. К указанным технологиям построения DTE/DCE-модемов относятся методы организации цифрового тракта в полосе частот типового широкополосного канала DIV (Data-In-Voice), ниже DUV (Data-Under-Voice) и выше DAV (Data-Above-Voice) плана частот группового линейного сигнала в АЛТ [1, 14].

Рассмотренные способы организации цифровых каналов и трактов при организации мультимедийного доступа нашли свою систематизацию в рабочих материалах 15-го Исполнительного Комитета (SG — Study Group) Международного союза электросвязи [3] по направлению телекоммуникации МСЭ-Т (ITU-T — International Telecommunication Union — Telecommunications) при разработке сценариев построения транспорта сети доступа (ANT — Access Network Transport).

Транспорт сети доступа ANT.

Основываясь на базовых понятиях, определенных в рекомендации ITU-T серии G.902 [3, 15], сеть доступа (AN — Access Network) обеспечивает транспортный канал переноса информации для внутренних сервисных средств телекоммуникаций между ин-

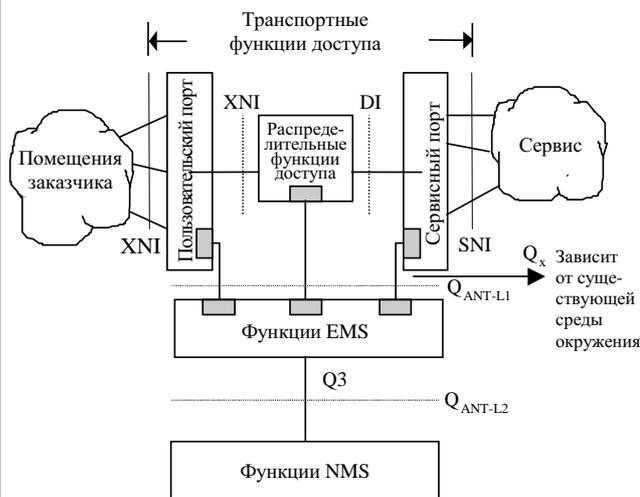


Рис. 2. Модель функционирования транспорта сети доступа ANT

терфейсом сервисного узла (**SNI** — Service Node Interface), необходимого для доступа заказчика к сервисному узлу, и каждым из вспомогательных интерфейсов к сети(ям) помещений заказчика (**CPN** — Customer Premises Network), которые группируются как сетевой интерфейс **XNI** (“x”-any Network Interface).

Реализация AN согласно **рис. 2** включает транспортные среды передачи и доступ по управлению к объектам сетевых элементов NE’s (**NE** — Network Element). Причем элемент сети доступа может быть сконфигурирован через интерфейс Q_x , что производится по эталонной точке q_3 . Эта эталонная точка q_3 , как определено в рекомендации ITU-T [15] серии M.3010, является точкой доступа для информации технологического управления конфигурацией, контроля характеристики и технического обслуживания системы.

Логическое и физическое представление эталонной модели транспорта сети доступа (**ANT RM** — Access Network Transport Reference Model) приведено на **рис. 3**. Эта эталонная модель основывается на обобщенной эталонной модели глобальной информационной инфраструктуры **ГИИ AN** (**ГИИ** — Global Information Infrastructure) [20] и на базовой модели, представленной в G.902 [15]. Логическое представление (рис. 3, а) показывает взаимоотношения различных сетей доступа AN’s и соотношения с други-

ми участками сети и/или сетями заказчика CPN, соответственно. Здесь логическая эталонная точка L — как физическое представление распределительного интерфейса (**DI** — Distribution Interface) сети доступа. Физическое представление **ANT RM** (рис. 3, б) включает те объекты, которые обеспечивают требуемые возможности транспортного канала переноса информации между интерфейсом сервисного узла (**SNI**) и каждым из вспомогательных интерфейсов сети помещений заказчика (**XNIs**). Сеть доступа может быть сконфигурирована и управляться через интерфейс Q_3 . Сеть доступа представляет собой встроенный распределительный интерфейс **DI** внутренних стыков в AN между доступами сетевых элементов **NEs**, который в частном случае может быть представлен как интерфейс между двумя сетями доступа **ANs**.

В эталонной модели **ANT RM** термин **NT** используется для обобщения сетевого окончания (**NT** — Network Termination) различных услуг. Для некоторых сервисов/конфигураций **NT** могло бы быть у заказчика интегрированным в **CPN**, однако с точки зрения физического функционирования это окончание сети доступа.

Сценарий организации сети доступа по линиям электропередачи.

Линии электропередачи ВЛЭП как высоковольтные терминалы (**PLT** — Power Line Terminals) широ-

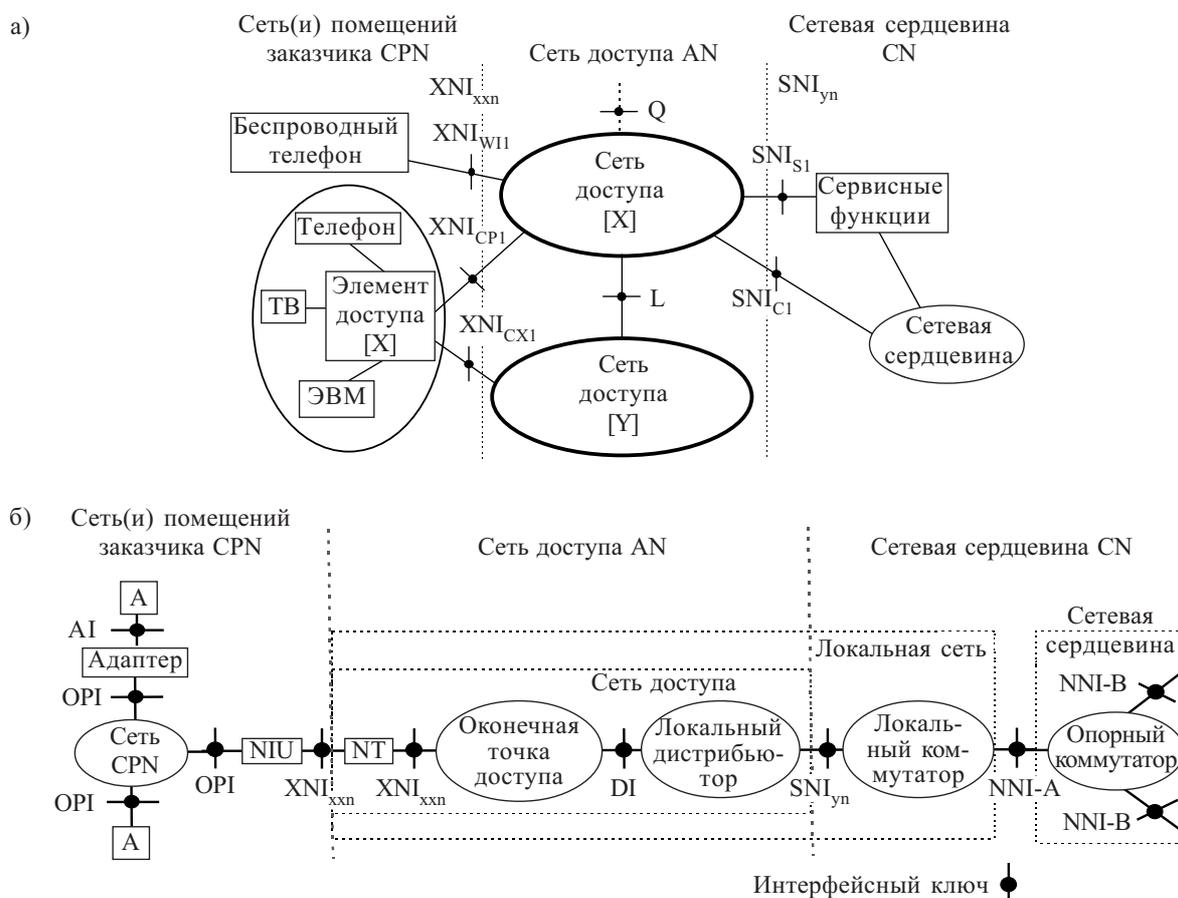


Рис. 3. Эталонная модель транспорта сети доступа ANT RM:
 а — логическое представление; б — физическое представление

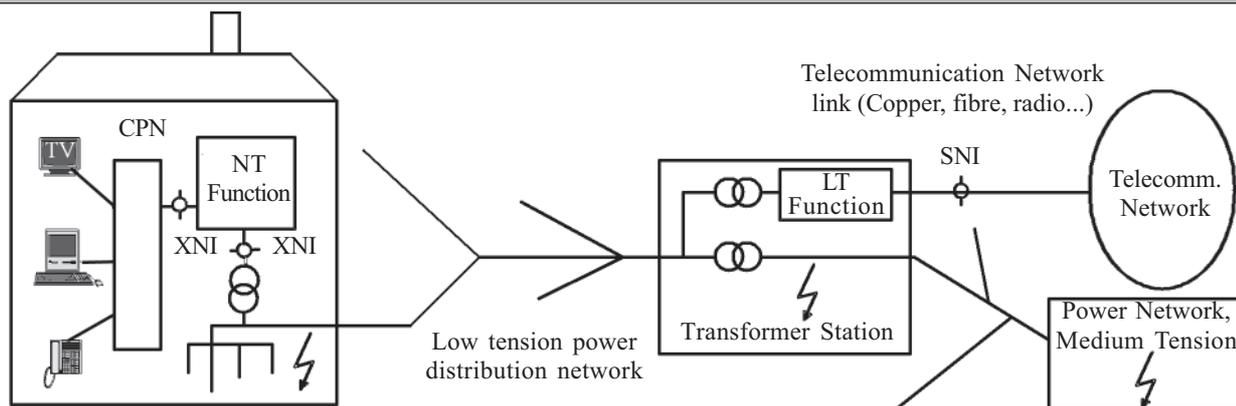


Рис. 4. Передача по высоковольтным линиям электропередачи

ко развернуты во всем мире. Имеются действующие стандартизации внутри Международной электротехнической комиссии (МЭК) (IEC — International Electrotechnical Commission) [19], Европейского института по стандартизации (ETSI — European Telecommunication Standards Institute) [16], а также рекомендации на соответствующих форумах (PLT-Forum) и в других стандартизирующих органах [17, 21].

Приведенный на рис. 4 сценарий изучается в Вопросах Q 1-4/15 Рабочей Группы РГ-5 (WP — Working Party) Исполнительного Комитета ИК-15 (SG — Study Group) МСЭ-Т (ITU-T). Данный сценарий, планируемый ITU-T/SG-15/WP-5, по счету является 8-м и служит в качестве основы организации транспорта сети доступа ANТ по ВЛЭП [3], детализация которой определяется существующим телекоммуникационным окружением.

Этапы перехода от аналоговых к цифровым системам ВЧ-связи

Неуклонно возрастающие потоки цифровых сообщений в корпоративной сети НЭК «Укрэнерго» обусловлены расширением инфраструктуры цифрового окружения в виде цифровых станций коммутации HiCOM (Siemens), Meridian (Nortel Networks) и систем передачи SMA-1 (Siemens), построением ло-

кальных вычислительных сетей LAN по Ethernet-стандартам IEEE 802.3 [21] и конечных компьютерных устройств PC по протоколам TCP/IP. Это приводит к необходимости организации высокоскоростных цифровых каналов и трактов по линейным сооружениям высоковольтных линий электропередачи [6].

Безусловно, стратегическим направлением здесь следует считать прокладку ВОЛС — как в непосредственной близости к ВЛЭП, так и по их тросонесущим конструкциям [10]. Однако еще достаточно продолжительное время будут широко использоваться каналы диспетчерской связи, каналы передачи команд радиорелейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗ и ПА), организованные непосредственно на воздушных линиях электропередачи [7, 8]. Поэтому построение предлагаемой "наложенной" цифровой сети интегрированного доступа ISAN позволит обеспечить многократное резервирование приоритетных каналов электросвязи ведомственной взаимосвязанной сети связи объединенной энергетической системы (ВСС ОЭС) Украины.

Обобщенное построение корпоративной ВСС ОЭС представлено на рис. 5.

Практическая реализуемость предлагаемого пути перехода от аналоговых (APLC — Analog Power Line Carrier) к цифровым (DPLC — Digital Power Line Carrier) системам ВЧ-связи заключается во вторичном использовании (технологической утилизации сети) существующей аналоговой инфраструктуры. Здесь могут быть предложены следующие варианты этапов (scenarios) "цифровизации" (digitalling).

Первый этап.

Передача цифровых данных выше полосы речевого сигнала по DAV-технологии, которая основана на принципе «надтонального телеграфирования». План распределения частот в данном варианте имеет вид, представленный на рис. 6.

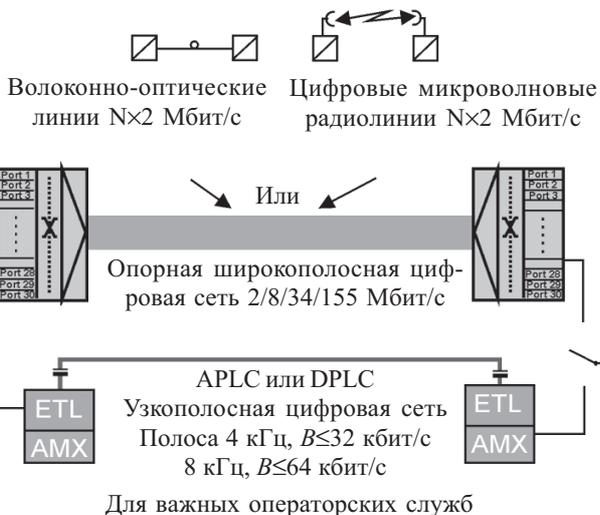


Рис. 5. Обобщенное построение корпоративной сети связи энергетических предприятий

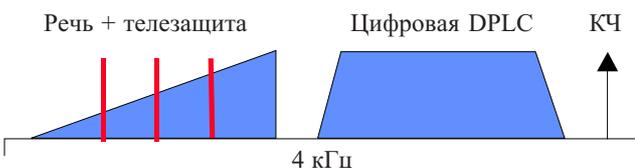


Рис. 6. Передача данных выше полосы речевого группового сигнала и сигнала телезащиты

Технологичность данных систем в аналоговом подканале "речь+телезащита" основана на известной технологии прямого цифрового синтеза. Скорость передачи данных в подканале цифровой DPLC достигает более чем 4,8 кбит/с, что позволяет организовать локальные вычислительные сети и/или до 10 речевых каналов приемлемого качества, основанных на цифровом сжатии с помощью вокодерных (Vocoder — Voice Coder) систем [9, 22].

Второй этап.

На данном этапе сохраняется цифровое формирование аналогового сигнала типового канала технологической связи "речь+телезащита+телеметрия" в полосе частот до 4 кГц и дополняется смежным вторым каналом с той же полосой в 4 кГц, но уплотненной только цифровой информацией (см. рис. 7).

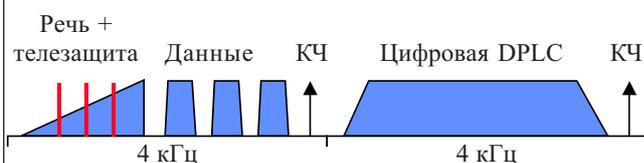


Рис. 7. Передача типового канала технологической связи и смежного высокоскоростного цифрового канала DPLC

Скорость передачи в смежном цифровом канале DPLC реально достигается равной 32 кбит/с, что при использовании гибкого временного мультиплексирования FLEX MUX позволяет как передавать речевые сигналы высокого "цифрового" качества, так и организовывать средне- и высокоскоростные каналы передачи данных, а также факсообщений группы G. III до 14,4 кбит/с [15].

Третий этап.

Этот этап характеризуется полным слиянием типового канала технологической связи и прилегающего к нему высокоскоростного DPLC-канала по спектрам и технологиям. Тем самым используется вдвоенная полоса частот 8 кГц канала, по которой передается агрегатный основной цифровой поток со скоростью передачи 64 кбит/с. Спектральная диаграмма его приведена на рис. 8.

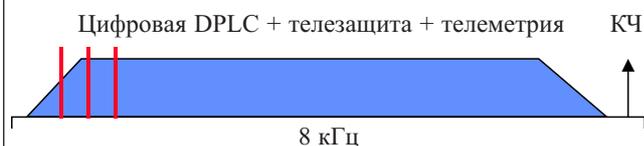


Рис. 8. Полностью цифровая передача DPLC

В сформированном таким образом высокоскоростном цифровом канале DPLC с помощью временного разделения, гибкого мультиплексирования разнородной информации, эффективных методов кодирования речевых сигналов, сжатия сигналов передачи данных и видео возможно транспортирование мультисервисных триединых (Triple Play) сообщений речь/видео/данные единым способом с оптимальным распределением сетевых ресурсов на динамической основе.

Оценка предельно достижимых скоростей передачи в полосно-ограниченных каналах и трактах DPLC-аппаратуры ВЧ-связи по воздушным линиям ВЛЭП

Обеспечение современного инфокоммуникационного сервиса с использованием интегрированного доступа по направляющей среде высоковольтных линий электропередачи, обладающих нестационарными параметрами и специфической помеховой ситуацией, выдвигает в основу "цифровизации" аппаратуры ВЧ-связи метод сетевой технологической утилизации — широкого использования уже существующих полосно-ограниченных стандартных каналов и групповых трактов.

В общих положениях отмечалось, что организация цифровых потоков в аналоговых каналах и/или трактах, сформированных по ВЛЭП аппаратурой ВЧ-связи по DPLC-технологии, производится вторичным уплотнением с помощью высокоскоростных профессиональных УПС. Здесь к УПС как к "аналоговым" широкополосным (Broadband Modem) DTE/DCE-модемам [1], работающим по технологиям DUV/DIV/DAV, предъявляются очень жесткие требования по помехоустойчивости при вторичном уплотнении многоканальных систем передачи (МСЦ-ЧПК) с частотным разделением каналов (FDM — Frequency Division Multiplexing). Такая высочайшая помехозащищенность DUV/DIV/DAV-модемов достигается комплексом мероприятий по использованию помехоустойчивого кодирования источника сообщений (коды BCH — Bose-Chaudhuri-Hocquenghem, RS — Rid-Solomon, ...), применением многоуровневых протоколов обмена при транспортировании мультимедийной информации (пакетирование по Frame Relay, ATM — Asynchronous Transfer Mode, TCP/IP — Transmission Control Protocol/Internet Program, ...), выбором методов помехозащищенной передачи и оптимального приема (Interleaving, TC — Trellis Coding, ...), а также — и в большей степени — на этапе организации цифроаналогового тракта высокоэффективными методами модуляции (QAM — Quadrature Amplitude Modulation, CAP — Carrierless Amplitude & Phase, DMT — Digital Multi-Tone, ...) с комбинацией всего вышеперечисленного.

Действительно, выбор эффективного метода модуляции является той отправной точкой, первичной ступенью по организации комбинированного цифроаналогового линейного тракта, начиная с которой уже можно заниматься повышением достоверности передачи по ВЛЭП цифровых сообщений ранее известными и будущими методами помехоустойчивого кодирования, эффективного транспортирования, оптимальной передачи и приема сигналов.

Основные понятия.

Предельно допустимые скорости передачи полезной информации V в Кбит/с по полосно-ограниченным каналам и трактам, организованным отечественными системами ВЧ-связи по ВЛЭП при использовании цифровой технологии DPLC, определяются качественными оценками по помехоустойчивости принимаемого сигнала, которые обеспечивают требуемые количественные соотношения по достоверности транспортируемых цифровых сообщений.

Таблица 1

Уровни суммарных помех в полосе Δf 1 кГц

Действующее напряжение, кВ*	6—35 (1)	110 (1)	220 (1)	330 (1)	330 (2)	500 (3)	750** (4)	1150*** (6)
Уровень суммарных помех, p_{Σ} , дБм0	-50	-40	-30	-15	-30	-25	-20	-20

* В скобках дано число проводов в фазе.

** Расчетные данные для типовых габаритов при проводах 4АСО-600.

*** Расчетные данные для проводов 8АСО-300.

Качественной оценкой помехоустойчивости принимаемого сигнала является защищенность — разность уровней полезного сигнала p_c и помехи p_n , приведенных в относительных логарифмических величинах по мощности с размерностью дБм либо, что полностью эквивалентно, логарифмической мере отношения мощностей сигнал/помеха P_c/P_n (SNR — Signal-to-Noise Ratio)

$$A_3 \equiv SNR = p_c[\text{дБм}] - p_n[\text{дБм}] = 10 \lg \frac{P_c}{P_n} [\text{дБ}]. \quad (1)$$

С другой стороны, принято, что количественной оценкой по достоверности информации, содержащейся в принимаемом цифровом сигнале, является вероятность ошибок (BER — Bit Error Rate), которая при нормальном (гауссовском) суммарном шуме связана с защищенностью A_3 интегралом вероятности по обратной функции ошибок $\text{erfc}(x)$:

$$P_{\text{ош}} \equiv BER = \text{erfc}[\text{dec}(0,1A_3)],$$

где введено следующее обозначение: $\text{dec}(x) = 10^x$.

Различают ожидаемые $P_{\text{ош.ож}}$ (практически реализуемые) и допустимые $P_{\text{ош.доп}}$ (теоретически нормируемые) вероятности ошибок, причем

$$P_{\text{ош.ож}} \leq P_{\text{ош.доп}},$$

которым соответствуют одноименные защищенности сигнала:

$$A_{3, \text{ож}} \geq A_{3, \text{доп}}.$$

Ожидаемая защищенность сигнала для обеспечения нормируемого качества цифровой связи в реальных условиях должна быть всегда выше допустимой на величину технологического запаса по требуемой помехоустойчивости (NM — Noise Margin) для конкретного вида "аналогового" DUV/DIV/DAV-модема на величину порядка

$$\Delta A_{\text{зап}} \equiv NM = A_{3, \text{ож}} - A_{3, \text{доп}} \cong (3 \dots 15) \text{ дБ}, \quad (2)$$

что обеспечивало бы "оптическое" качество связи $P_{\text{ош}} = 10^{-10}$ на высоком по помехоустойчивости уровне работы DPLC-системы в целом

$$SNR(BER = 10^{-10}) \equiv A_3(P_{\text{ош}} = 10^{-10}).$$

Для оценки помехоустойчивости модема при иных пороговых значениях качества связи известна аппроксимационная зависимость защищенности сигнала (с приемлемой для эксплуатации 6%-ной точностью в области практических значений по достоверности $P_{\text{ош.ож}} = BERT = (10^{-4} \dots 10^{-12})$, (BERT — Bit Error Rate Testing)), как функции от вероятности ошибок $A_3 \cong f(P_{\text{ош}})$:

$$A_3(P_{\text{ош}}) = \frac{A_3(P_{\text{ош}} = 10^{-10})}{2} \{1 + \lg[-\lg(P_{\text{ош}})]\}. \quad (3)$$

Безусловно, представляют интерес также и усредненные данные об уровнях суммарных помех $p_{\Sigma 0}$, дБм0 в точке нулевого относительного уровня ТНОУ (OTLP — Zero Transmission Level Point) для каналов аппаратуры ВЧ-связи, работающей на линиях различных классов по напряжению типовых габаритов ВЛЭП (см. табл. 1) в паспортизируемой полосе частот $\Delta f = 1$ кГц [1, с. 142].

Заметим, что расчет уровней суммарных помех в заданную рабочую полосу частот ΔF аналогового канала/тракта производится как верхняя граница согласно следующему эмпирическому соотношению:

$$p_{\Sigma 0}(\Delta F) = p_{\Sigma 0} + 10 \lg \Delta F [\text{кГц}], \text{ дБм0}, \quad (4)$$

а пересчет в иную точку нулевого относительного уровня OTLP p_0 , по принятому понятию относительных уровней дБм0, имеет вид

$$p_n(\Delta F) = p_{\Sigma 0}(\Delta F) + p_0, \text{ дБм}. \quad (5)$$

При этом с вероятностью $P = 10^{-4}$ (0,01%) уровень помех при эксплуатации ВЧ-систем связи по ВЛЭП может быть еще на 15 дБм [7, с. 144] выше расчетного (5).

$$p_{\Sigma \text{ макс}}(\Delta F) = p_n(\Delta F) + 15, \text{ дБм}. \quad (6)$$

Таким образом, под обобщающим уровнем качества цифровой связи в DPLC-системах будем понимать запас NM ожидаемой в реальных условиях помехозащищенности сигнала $\Delta A_{\text{зап}}$ для конкретных видов модуляций в DUV/DIV/DAV-модемах. Данный уровень качества применительно к нестационарной направляющей среде распространения, к которой относятся открытые физические цепи ВЛЭП, с учетом (6), рекомендуется оценивать субъективными способами. К таким критериям относятся, в частности, экспертные оценки по 5-бальной таблице усредненных мнений

Таблица 2

Пятибальная таблица оценки качества цифровой связи в DPLC-системах

Критерий качества связи	Запас по ожидаемой помехоустойчивости NM "аналогового" модема, дБ	Уровень качества цифровой связи по DPLC-системе
0	Ниже 0	Связь неустойчивая
1	$0 \leq NM < 1,5$ (порог в $\sqrt{2}$ раз по напряжению)	Плохой
2	$1,5 \leq NM < 3$ (порог в 2 раза по напряжению)	Неудовлетворительный
3	$3 \leq NM < 6$ (порог в 2 раза по мощности)	Удовлетворительный
4	$6 \leq NM < 15$ (порог для плохих условий)	Хороший
5	Выше 15	Высокий

ний (**MOS** — Mean Opinion Score) по рекомендациям ITU-T G.108 и P.800 [9, 15], за которые примем уровень запаса ожидаемой помехоустойчивости конкретного типа модема согласно **табл. 2**.

QAM-технология.

Технология квадратурной амплитудной модуляции **КАМ (QAM** — Quadrature Amplitude Modulation) основана на эффективном "обужении" спектра информационного сообщения: работа на сверхнайквистовских удельных скоростях передачи, которые реально достигли 15 бит информации на один герц полосы [14]. Технологический прорыв здесь обусловлен резким увеличением разрешенных точек сигнального созвездия много-М-позиционного QAM-сигнала при формировании найквистовского [1] спектра в полосе занимаемых частот, равной

$$\Delta F^{QAM} \equiv \frac{B_{TX}}{\log_2 M} (1 + \alpha_N), \quad (7)$$

где $B_{TX} = B_{Inf} + \Delta B$ — линейная скорость передачи агрегатного (группового) цифрового потока, состоящая из полезной информационной скорости передачи B_{Inf} и дополнительной скорости $\Delta B \ll B_{Inf}$, отводимой для повышения достоверности методами избыточного помехоустойчивого перемежающегося (Interleaving) кодирования, α_N — коэффициент сглаживания импульса найквистовской формы ($0 \leq \alpha_N \leq 1$), который в практических условиях находится в пределах $\alpha_N = 0,1 \dots 0,2$.

Заметим, что при использовании помехоустойчивого решетчатого кодирования (**ТС** — Trellis Coding) обеспечивается выигрыш по позиционности сигнального созвездия QAM-сигнала, эквивалентный увеличению на 1 количества информационных битов, т. е. уравнение (7) занимаемой полосы передачи принимает следующий вид:

$$\Delta F^{QAM+TC} \equiv \frac{B_{TX}}{1 + \log_2 M} (1 + \alpha_N). \quad (8)$$

С другой стороны, рост количества разрешенных точек М-позиционного QAM-сигнала уменьшает эвклидово расстояние между ними, что требует значительного увеличения допустимой помехозащищенности $A_{з,доп}(P_{ош})$ "аналогового" модема. Так, допустимая защищенность для обеспечения оптического качества связи $BER = 10^{-10}$ должна быть увеличена на уровень мощности QAM-сигнала и составлять соответствующее значение:

$$\begin{aligned} SNR(BER = 10^{-10}) &\equiv A_{з,доп}(P_{ош} = 10^{-10}) = \\ &= 16,1 + 10 \lg \frac{M - 1}{3}, \text{ дБ.} \end{aligned} \quad (9)$$

Полученные выражения (6)—(9) с учетом соотношения пересчета (3) на иной допустимый по норме уровень порога вероятности ошибок позволяет выбрать позиционность вида QAM-модуляции для передачи заданного агрегатного цифрового потока в требуемой полосе частот широкополосного канала/группового DPLC-тракта аппаратуры ВЧ-связи по ВЛЭП. При этом по реальной помеховой ситуации (5), (6) с

учетом табл. 1 можно обеспечить необходимый уровень качества транспортирования агрегатного цифрового потока и субъективно оценить работоспособность DPLC-системы в целом.

В качестве иллюстрации разработанной методики оценки предельно достижимых скоростей передачи в полосно-ограниченных каналах и трактах аппаратуры ВЧ-связи по воздушным линиям ВЛЭП рассмотрим ряд показательных примеров, на основании которых возможна как выработка предварительных условий относительно технических характеристик систем по DPLC-технологии, так и обоснование пакета требований к электрическим параметрам физических цепей ВЛЭП и к частотно-зависимым характеристикам аппаратуры устройств присоединения.

Пример 1. Оценить минимально необходимую позиционность многоуровневой модуляции "аналогового" модема с QAM-сигналом и решетчатым кодированием ТС при транспортировании агрегатного цифрового потока со скоростью передачи $B_{TX} = 16$ кбит/с в полосе частот одного канала аппаратуры ВЧ-связи $\Delta F = 4$ кГц. Определить для предложенного созвездия QAM-М требуемую помехоустойчивость сигнала $A_{з,доп}$ на выходе канала аппаратуры ВЧ-связи для обеспечения достоверности передачи информации не хуже чем $P_{ош,доп} = 10^{-4}$.

В отсутствие полнодоступных сведений и исходных данных о DPLC-аппаратуре (что является ноу-хау любой из энергетических компаний, см., например, технические характеристики системы PLC5000 энергетической группы AREVA T&D [23]) примем верхнюю границу коэффициента сглаживания импульса найквистовской формы равной

$$\alpha_N = 0,2.$$

На основании выражения (8) при условии $\Delta F \approx \Delta F^{QAM+TC} = 4$ кГц определим требуемую позиционность сигнального созвездия М:

$$\begin{aligned} M &= \text{oct} \left[\text{int} \left\{ \frac{B_{TX}}{\Delta F^{QAM+TC}} (1 + \alpha_N) - 1 \right\} \right] = \\ &= \text{oct} \left[\text{int} \left\{ \frac{16000}{4000} (1 + 0,2) - 1 \right\} \right] = 16. \end{aligned}$$

Здесь введены обозначения $\text{oct}[x] = 2^x$; $\text{int}\{x\}$ — оператор округления в сторону увеличения до ближайшего целого кратного четырем значения выражения, стоящего в скобках.

Для выбранного сигнального созвездия амплитудно-фазовой модуляции QAM-16 определим по (9) допустимую защищенность сигнала для обеспечения "оптического" качества связи $BER = 10^{-10}$:

$$\begin{aligned} A_{з,доп}^{QAM-16}(P_{ош} = 10^{-10}) &= 16,1 + 10 \lg \frac{M - 1}{3} = \\ &= 16,1 + 10 \lg \frac{16 - 1}{3} = 23,1 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

Произведем пересчет по аппроксимации (3) допустимой защищенности сигнала $A_{з,доп}^{QAM-16}(P_{ош} = 10^{-10})$ в заданную помехозащищенность $P_{ош,доп} = 10^{-4}$ "аналогового" модема, работающего по одному каналу аппаратуры ВЧ-связи.

$$A_{з,доп}^{QAM-16}(P_{ош,доп} = 10^{-4}) = \frac{A_{з,доп}^{QAM-16}(P_{ош} = 10^{-10})}{2} \times \\ \times \{1 + \lg[-\lg(P_{ош,доп})]\} = \frac{23,1}{2} \{1 + \lg[-\lg 10^{-4}]\} = 18,5 \text{ дБ.}$$

Полученные результаты расчета DPLC-системы в полосе одного 4-кГц-канала со скоростью передачи информации 16 кбит/с с помощью 16-позиционной квадратурной амплитудной модуляции QAM-16 и решетчатым кодированием, действительно, достаточно хорошо коррелируют с декларируемыми техническими характеристиками аппаратуры PLC5000 энергетической группы AREVA T&D [23].

Пример 2. Определить требуемую помехозащищенность системы по DPLC-технологии с модуляцией QAM-64 для организации основного цифрового канала ОЦК (DS0 — Digital Signal 0-level) с достоверностью передачи $P_{ош,доп} = 10^{-4}$ в эквивалентной полосе частот четырех каналов аппаратуры ВЧ-связи $4\Delta F = 16$ кГц по ВЛЭП.

Убедимся, действительно ли в полосе частот, эквивалентной четырем каналам ТЧ, равной $4\Delta F = 16$ кГц, способом модуляции QAM-64 возможна организация основного цифрового канала $B_{DS0} = B_{Inf} = 16$ кбит/с с введением дополнительной скорости ΔB , отводимой для повышения достоверности передачи. Примем (что широко используется в практических случаях) значение дополнительной скорости передачи известными методами избыточного перемежающегося кодирования кратным 8 кбит/с:

$$\Delta B = 8 \text{ кбит/с.}$$

Тогда групповая скорость сформированного агрегатного цифрового потока, равная

$$B_{TX} = B_{Inf} + \Delta B = 64 + 8 = 72 \text{ кбит/с,}$$

согласно уравнению (7), будет передаваться "аналоговым" модемом с модуляцией QAM-64 в полосе частот

$$\Delta F^{QAM-64} \equiv \frac{B_{TX}}{\log_2 M} (1 + \alpha_N) = \frac{72}{\log_2 64} (1 + 0,2) = 14,4 \text{ кГц,}$$

что, действительно, соответствует эквивалентной полосе частот четырех каналов аппаратуры ВЧ-связи, т. е.

$$4\Delta F = 16 \text{ кГц} > \Delta F^{QAM-64} = 14,4 \text{ кГц,}$$

Для "оптического" качества связи $BER = 10^{-10}$ системы по DPLC-технологии с модуляцией QAM-64 допустимая помехозащищенность сигнала, согласно выражению (9), соответствует значению

$$A_{з,доп}^{QAM-64}(P_{ош} = 10^{-10}) = 16,1 + 10 \lg \frac{M-1}{3} = \\ = 16,1 + 10 \lg \frac{64-1}{3} = 29,3 \text{ дБ.}$$

Аналогично предыдущему примеру, произведем пересчет (3) полученной допустимой защищенности сигнала QAM-64 $A_{з,доп}^{QAM-64}(P_{ош} = 10^{-10})$ на требуемый уровень достоверности $P_{ош,доп} = 10^{-4}$ "аналогового" модема:

$$A_{з,доп}^{QAM-64}(P_{ош,доп} = 10^{-4}) = \frac{A_{з,доп}^{QAM-64}(P_{ош} = 10^{-10})}{2} \times \\ \times \{1 + \lg[-\lg(P_{ош,доп})]\} = \frac{29,3}{2} \{1 + \lg[-\lg 10^{-4}]\} = 23,5 \text{ дБ.}$$

Отметим, что полученные расчеты также полностью согласуются с техническими характеристиками аппаратуры Digital PLC модели EBS 2000i корпорации Siemens [24].

Пример 3. Оценить качество цифровой связи в примерах 1 и 2 для DPLC-систем, работающих по воздушным линиям ВЛЭП с действующим напряжением 110 кВ для типовых габаритов при использовании одного провода 4АСО-600 в фазе. Учесть, что для устранения перегрузки линейного усилителя мощности уровень передачи "аналогового" модема устанавливается на 3 дБм ниже нормируемого в точке нулевого относительного уровня 0TLP.

В соответствии с табл. 1 усредненных данных уровень суммарных помех в точке нулевого относительного уровня 0TLP в полосе $\Delta f = 1$ кГц для каналов аппаратуры ВЧ-связи, работающей по воздушным линиям ВЛЭП с действующим напряжением 110 кВ, при использовании одного провода 4АСО-600 в фазе равен

$$p_{п0} = -40 \text{ дБм0.}$$

"Аналоговый" модем в примере 1 работает в полосе одного канала аппаратуры ВЧ-связи $\Delta F^{QAM+TC} = 3,84$ кГц, а в примере 2 — в полосе четырех каналов — $\Delta F^{QAM-64} = 14,4$ кГц. Тогда приведенный уровень шумов для каждого из вариантов в 0TLP (4) равен

$$p_{п0}^{QAM-16+TC}(\Delta F) = p_{п0} + 10 \lg \Delta F^{QAM-16+TC} = \\ = -40 + 10 \lg 3,84 = -34,2 \text{ дБм0}$$

и

$$p_{п0}^{QAM-64}(\Delta F) = p_{п0} + 10 \lg \Delta F^{QAM-64} = -40 + 10 \lg 14,4 = \\ = -28,4 \text{ дБм0,}$$

соответственно.

Определим ожидаемую защищенность (1) при относительном уровне -3 дБм0 передачи "аналогового" модема по мощности в точке 0TLP рассматриваемых вариантов для модуляции QAM-16 с решетчатым кодированием TC —

$$A_{з,ож}^{QAM-16+TC} = p_{с0} - p_{п0}(\Delta F^{QAM-16+TC}) = -3 - (-34,2) = \\ = 31,2 \text{ дБ}$$

и модуляции QAM-64 с перемежающимся кодированием:

$$A_{з,ож}^{QAM-64} = p_{с0} - p_{п0}(\Delta F^{QAM-64}) = -3 - (-28,4) = 25,4 \text{ дБ.}$$

Тогда запас NM (2) ожидаемой в реальных условиях эксплуатации помехоустойчивости сигнала $\Delta A_{зап}$ для каждого из видов модуляции равен:

$$\Delta A_{зап}^{QAM-16+TC} = A_{з,ож}^{QAM-16+TC} - A_{з,доп}^{QAM-16+TC} = 31,2 - 18,5 = \\ = 12,7 \text{ дБ;}$$

$$\Delta A_{зап}^{QAM-64} = A_{з,ож}^{QAM-64} - A_{з,доп}^{QAM-64} = 25,4 - 23,5 = 1,9 \text{ дБ.}$$

Полученные в примере 1 результаты, согласно табл. 2, соответствуют «хорошему» ($NM^{QAM-16+TC} = 12,7$ дБ) уровню качества цифровой связи по 5-бальной экспертной оценке ($MOS^{QAM-16+TC} = 4,744$) для DPLC-системы с квадратурной амплитудной модуляцией QAM-16 и безыбыточным решетчатым кодированием TC, которая образует в рабочей полосе частот одного канала $\Delta F = 4$ кГц аппаратуры ВЧ-связи

цифровой поток со скоростью $V_{ТХ}=16$ кбит/с при достоверности передачи не хуже чем $P_{\text{ош.доп}}=10^{-4}$. Однако при организации ОЦК с той же достоверностью $P_{\text{ош.доп}}=10^{-4}$ в полосе частот, эквивалентной четырем каналам тональной частоты (ТЧ), равной $4\Delta F=16$ кГц, способом модуляции QAM-64 с введением дополнительной скорости $\Delta B=8$ кбит/с, отводимой для повышения достоверности передачи методом избыточного перемежающегося кодирования (Interleaving), субъективный критерий качества упал до отметки $MOS_{\text{QAM-64}}=2,266$, что явно соответствует «неудовлетворительному» уровню качества цифровой связи ($NM_{\text{QAM-64}}=1,9$ дБ).

В заключение следует особо отметить, что обобщающие примеры 1—3 относятся исключительно к QAM-Technology так называемого "одноканального" модема, где вся рабочая полоса частот либо одного (пример 1), либо группы из четырех каналов (пример 2) отводится для передачи агрегатных цифровых сообщений. Полученное в первом случае качество связи — «хорошее», а во втором — «неудовлетворительное». Хотя если использовать для второго варианта четыре независимых аналоговых канала (как и в примере 1), в каждом из которых передавался бы 16-килобитный поток DS0/4 на уровне «хорошего» качества, а методом временного гибкого мультиплексирования (временного уплотнения — объединения/разделения цифровых потоков более низкой ступени иерархии) FLEX MUX, то транспортировался бы ОЦК с его агрегатной скоростью $4 \times 16 = 64$ кбит/с, но уже на том же уровне (не худшем, чем «хорошее») качества цифровой связи. Такой метод «многоканального» модема нашел свое непосредственное применение в последней из технологий многоканальной модуляции (DMT — Discrete Multi-Tone) [5, 18—21].

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Bocker P. ISDN: The integrated services digital network — concepts, methods, systems.— Berlin—New York—London: Springer-Verlag, 1992.
2. Durd N. The ISDN subscriber loop.— N.-Y.: Chapman and Hall, 1997.
3. ITU-T, Study Group 15 (Optical and other transport infrastructures). Access Network Transport, <http://www.itu.int/itudoc/itu-t/com15/ant>.
4. Пантелеев В. В. Организация высокоскоростных цифровых каналов на аналоговой первичной сети связи // Зв'язок.— 1998.— № 1.— С. 32—37.
5. Пантелеев В. В., Громовой А. К. Образование транспорта интегрированной сети доступа на существующей первичной сети электросвязи // Вісник УБЕНТЗ.— 1999.— № 8.— С. 51—55.
6. Курицын Е. М., Малярчук Ю. С., Пантелеев В. В. Пути перехода от аналоговых к цифровым системам ВЧ-связи для высоковольтных линий электропередачи // Моделювання та інформаційні технології.— Київ, 2004.— Вип. 26.— С. 73—81.

7. Микуцкий Г. В. Каналы высокочастотной связи для релейной защиты и автоматики.— М.: Энергия, 1977.
8. Микуцкий Г. В., Шкарин Ю. П. Линейные тракты каналов высокочастотной связи по линиям электропередачи.— М.: Энергия, 1986.
9. Вемян Г. В. Передача речи по сетям электросвязи.— М.: Радио и связь, 1985.
10. Chomycz V. Fiber Optic Installations: A Practical Guide, McGraw-Hill Companies, Inc.— 1996.
11. Гамидов Г. С., Пантелеев В. В., Яценко С. Г. Двухпроводное дуплексное устройство преобразования сигналов УПС-64 с эхокомпенсатором // Электросвязь.— 1989.— № 1.— С. 36—39.
12. Брескин В. А., Пантелеев В. В. Адаптивная регенерация цифровых сигналов в проводных ЦСП для абонентских линий // Электросвязь.— 1994.— № 11.— С. 12—14.
13. Panteleev V. V. Estimation's method at most attainable of lengths symmetrical digital subscriber line on xDSL-technologies: engineering-maintenance of the calculation // Inter. Conf. "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science".— Lviv—Slavsko, Ukraine.— 2006.— P. 365—369.
14. Ghamberlin J. W., Hester C. E., Meyers J. J. et al. Design and field test of a 256-QAM DIV modem // IEEE Journal on Selected Areas in Commun.— 1987.— Vol. SAC-5, N 3.— P. 349—356.
15. ITU-T International Recommendations. <http://www.itu.int/rec/T-REC/e>: E.800, G.109, G.902, G.991.1, G.991.2, G.995.1; I.412, I.430, M.3010, P.800, T.38, Y.110, Y.120.
16. ETSI European Standards. <http://www.etsi.org>: TR 102 324, TR 102 269, TR 102 270, TR 102 258, TR 102 259, TR 102 175, TR 102 049, TS 101 896, TS 101 867, TS 101 012, TS 101 135, TS 101 524, TS 101 524-1, TS 101 524-2; TR 101 830-1; ETR 152.
17. ANSI/ATIS (T1) American Standards <http://www.ansi.org>: T1.418-2002, T1.422-2001; T1.TR.28-1994, T1.TR.59-1999; T1.TRQ.06-2001.
18. Аппаратура каналов связи и телемеханики по линиям электропередачи АКСТ «ЛИНИЯ-М-ПУ-ПК» ОАО «Шадринский телефонный завод». http://shtz.shadrinsk.net/pr_akst-m.htm.
19. IEC International Standards. <http://www.iec.ch>: IEC 60353, IEC 60358, IEC 60481, IEC 60495, IEC 60663, IEC 60834-1, IEC 60834-2.
20. Карпишин В. И., Мишляков С. И., Пантелеев В. В. Интеллектуалізація в галузі зв'язку // Вісник УБЕНТЗ.— 2002.— № 1.— С. 34—37.
21. IEEE 802™ Standards Association. <http://standards.ieee.org> IEEE 802.3-2000, IEEE 802.3ab-1999, IEEE 802.3-2002.
22. Карпишин В. И., Мишляков С. И., Пантелеев В. В. Обгрунтування вибору технічних вимог щодо нових технологій транспортування фонових повідомлень у глобальних обчислювальних мережах // Моделювання та інформаційні технології.— Київ, 2005.— Вип. 31.— С. 36—41.
23. Аппаратура PLC5000 группы энергетических предприятий AREVA T&D. http://www.aveva-td.com/servlet/ContentServer?pagename=OpenMarket/Xcelerate/Render&c=AGF_Product&cid=1081165238082&rid=1018348589697&norid=true.
24. Комплект цифровой аппаратуры Digital PLC-Technology моделей POWERLINK, AKE 100 и гибких мультиплексоров PMX 2000/PMX 3000 корпорации Siemens. <http://www.energy-portal.siemens.com>.

Р. В. БЫРКА

Россия, г. С.-Петербург, ОАО «ЭлектроРадиоАвтоматика»
E-mail: era48@mail.ru

Дата поступления в редакцию
27.03 2006 г. — 22.01 2007 г.

Оппонент д. ф.-м. н. О. А. ПОДСВИРОВ
(СПГМТУ, г. С.-Петербург)

ЭВОЛЮЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ РЭС

Предлагается метод решения задач синтеза формы и структуры конструктивных элементов и модулей для перспективных РЭС.

Снижение массы радиоэлектронных средств (РЭС) за счет более рационального использования материалов позволяет улучшить эксплуатационные характеристики и расширить область применения аппаратуры. Минимальную массу имеют, как правило, равнопрочные изделия. Конструирование таких изделий сводится к воспроизведению оптимальной формы, диктуемой условием равнопрочности. В качестве такого условия может рассматриваться, например, равенство запасов прочности каждого достаточно малого элемента объема материала несущей конструкции (НК).

При заданных механических воздействиях выбор оптимальной конфигурации элементов НК РЭС целесообразно выполнять на основе исследования напряженно-деформированного состояния с учетом действующих эксплуатационных нагрузок и конструктивно-технологических ограничений. Однако аналитические методы расчета позволяют определить напряженно-деформированное состояние элементов НК с удовлетворительной для практики точностью лишь для сравнительно немногих простейших случаев нагружения и простой конфигурации. Эффективность уменьшения чрезмерных запасов прочности как способа снижения массы РЭС зависит от соотношения массы расчетных и нерасчетных элементов НК.

Для реализации численных методов поиска конструктивной формы или конфигурации элементов и узлов, несущих заданную нагрузку, по результатам исследования напряженно-деформированного состояния разработаны алгоритмы, основанные на следующих положениях:

- поиск оптимальной конфигурации осуществляется путем целенаправленного многократного формирования границ области решения краевой задачи;

- каждое преобразование выполняется на расчетной модели и с физической точки зрения соответствует введению, удалению или перераспределению достаточно малых объемов материала конструктивной формы;

- нагрузка элементов объема материала в соответствии с выбранной гипотезой разрушения оцени-

вается, например, по главным нормальным или максимальным касательным напряжениям, энергии деформации или формоизменения и т. д.;

- оптимизация формы выполняется с целью выравнивания распределения нагрузки по объему материала. В качестве оптимальной рассматривается конструктивная форма, каждый элемент объема материала которой находится одинаково далеко от условий разрушения или несет нагрузку, достаточно близкую к средней нагрузке всех элементов объема.

На основе изложенных выше положений formalizована задача моделирования эволюции или развития формы конструкции при заданных тепловых и механических воздействиях. Моделирование проводится при выборе некоторой исходной (начальной) формы, которая может быть как избыточной, так и недостаточной по объему используемого материала. Каждый шаг многошаговой процедуры преобразований включает автоматическое формирование системы разрешающих уравнений, расчет напряженно-деформированного состояния, исследование распределения нагрузки по объему материала, преобразование формы конструкции [1—4].

Задачи прикладного оптимального проектирования

Естественной целью проектирования является получение некоторого положительного эффекта при ограничениях на ресурсы и обеспечении необходимых условий работы исполнителей. Моделирование традиционно рассматривается как этап проектирования, когда математические модели используются для оценки и анализа системы до ее воплощения в материале. Математическое моделирование предполагает количественное описание функций, которые должны выполнять система и любая требуемая подсистема. В частности, при проектировании НК РЭС по заданным эксплуатационным требованиям выбираются конфигурация и размеры частей, далее проводится математическое исследование конструкции, определяется ее реакция на требуемую нагрузку. Если поведение НК не является удовлетворительным, проводится изменение проекта, и конструкция подвергается повторному математическому исследованию. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будет получен лучший или удовлетворительный проект. Для получения лучшей НК необходимо иметь возможность исследовать все возможные варианты ее исполнения.

Наиболее остро задача синтеза стоит при обеспечении жесткости и прочности НК. Как правило, имеется возможность провести анализ НК, подверженных заданной нагрузке, получить значения напряжений, смещений и собственных частот. При этом может оказаться неясным, какую форму и структуру НК необходимо выбрать, какие пропорции должны быть установлены для наиболее эффективного использования материала при удовлетворении требований жесткости и прочности [5].

Традиционный подход к оптимальному проектированию предполагает наличие модели системы НК как неотъемлемой части описания проекта. Исходя из ограничений и требований к проекту выбирается конечное фиксированное число переменных проектирования $P=[p_1, \dots, p_k]^T$. При этом множество P в пространстве R^k , из которого выбираются переменные проектирования p , определяется как множество их допустимых значений. Выделяется переменная состояния $Q=[q_1, \dots, q_n]^T$, которая описывает состояние системы. Переменная состояния Q может однозначно определяться, например, из системы алгебраических уравнений, описывающих равновесие системы, или как решение задачи Коши, описывающей динамику системы, если выбрана переменная проектирования P . Причем выбор лучшего проекта из множества допустимых состоит в нахождении наибольшего или наименьшего значения некоторой функции переменной проектирования p из P . Такой подход предопределяет трактовку задач оптимального проектирования как задач минимизации критерия качества $\psi_0(P, Q)$ при фиксированной структуре проекта, представляемой множеством P .

Очевидны два принципиально различных метода решения задач оптимизации. Первый — основан на знании свойств выражений, задающих критерий качества и ограничения в точке экстремума. Второй, более распространенный, основан на исследовании локальных областей. Этот метод принято называть прямым методом. Задается начальное приближение для вектора переменных проектирования P_0 . Далее можно попытаться найти второй вектор P_1 , который лежит в области допустимых значений или близко от нее, таким образом, чтобы отвечающая этому вектору точка на поверхности, задаваемой критерием качества, лежала ближе к точке экстремума. Обычно имеется информация лишь о малой части поверхности, соответствующей критерию качества, что обусловлено локальными свойствами выполняемых математических операций. С использованием только этой локальной информации могут быть построены алгоритмы, обеспечивающие нахождение нового вектора P_1 , для которого движение на поверхности, задаваемой критерием качества, осуществляется к точке, лежащей ниже точки, отвечающей предыдущему приближению P_0 . Многочисленные методы оптимизации основаны на этой достаточно простой идее [6].

Задачи, в которых проектирование и функционирование системы описывается конечным числом переменных проектирования, определяются как конечномерные. Все изложенное относится к системам, проектирование которых сводится к отысканию ко-

нечного числа параметров или конечномерного вектора параметров. Эти векторы выбираются таким образом, чтобы система удовлетворяла заданным ограничениям и была оптимальна в некотором смысле. Математическую модель для класса задач оптимального проектирования, введенного выше, принято называть параметрическим оптимальным проектированием [7].

Многие практически значимые задачи снижения материалоемкости НК формулируются как задачи выбора формы, элементов, несущих определенную нагрузку. Известны решения задач нахождения распределения геометрических характеристик по определенному направлению, связанному с конфигурацией проектируемого элемента. Типичными, например, являются задачи отыскания распределений толщин для балок и пластин. Классическим примером является задача проектирования колонны минимальной массы. Здесь для определения формы проектируемого элемента требуется выбрать функции формы, отвечающие оптимальному проекту элемента НК. В этом случае необходимо решать задачи с граничными условиями и находить, например, распределение деформаций и напряжений в упругом теле.

Очевидно, что функция формы должна определяться из решения оптимизационной задачи. Кроме того, действительные значения минимизируемых величин определяются функциями, задающими указанные кривые. Поэтому рассматриваемые функции формы являются функционалами [8]. Формулировка оптимизационной задачи проектирования здесь отличается от изложенной выше: определить непрерывную функцию распределения материала $u(x)$ на отрезке $x^0 \leq x \leq x^1$ так, чтобы минимизировать функционал $\psi_0(u(x), q)$. В этом случае рассматриваются системы, которые описываются функциями, определенными в некоторой заданной области пространства. Математически эти задачи трактуются как бесконечномерные.

Для бесконечномерных задач переменная состояния q определяется краевой задачей при заданной переменной проектирования $u(x)$. Данный класс задач принято относить к задачам оптимального проектирования систем с распределенными параметрами. Выделим два отличающихся типа переменных системы. В первом случае проект системы будет определен, как только определится вектор параметров проектирования P . Во втором случае проект определяется функцией $u(x)$ распределения материала. В каждом случае переменные состояния Q представляют собой отклик системы на приложенную нагрузку.

В принципе уравнения состояния можно разрешить относительно переменных проектирования и подставить результат в ограничения. Но зачастую даже в простой задаче подобное преобразование непрактично, в реальных задачах большой размерности оно практически неосуществимо [9].

Краткий обзор концепций и методов прикладного оптимального проектирования позволяет сделать следующие выводы.

Для выбранного проекта в настоящее время не существует методики автоматической оптимизации, ко-

торая могла бы давать решение любой поступившей задачи. Однако существует возможность регулярно подхода к решению задач синтеза и оптимизации проекта. Этот подход, возможно, приведет к оптимальному решению, если материальные и временные затраты на его реализацию окажутся в допустимых разумных пределах.

Анализ функции фактически означает неформализованный синтез структуры проектируемого изделия, что, в свою очередь, позволяет задать вектор переменных проектирования P и переменных состояния Q . При этом не гарантируется существование номинального или приемлемого и, тем более, оптимального решения. Зачастую необходимо выполнять процедуру повторного синтеза с последующей параметрической оптимизацией до получения приемлемого решения. Повторный синтез структуры предполагает изменение вида и числа компонентов вектора переменных проектирования P и вектора переменных состояния Q , что может привести к необходимости модификации или изменения метода параметрической оптимизации.

Предлагаемые методы проектирования систем с распределенными параметрами обеспечивают возможность оптимизации выбранных и установленных конструктивных форм. Определение переменной проектирования $u(x)$ соответствует изменению распределения материала и приводит к вычислению топологически подобных конструкций. С математической точки зрения метод соответствует изменению границ области по результатам решения краевой задачи. Причем граница, подлежащая вычислению, устанавливается проектировщиком до решения задачи оптимального проектирования. Следовательно, и в данном случае задача оптимального проектирования решается для фиксированной структуры проекта.

Автоматическое проектирование совершенных изделий возможно на основе формализации задачи синтеза проекта, т. е. вычисления вида и числа компонентов вектора P конечномерных задач проектирования и формирования границ, устанавливаемых функцией распределения материала $u(x)$ для бесконечномерных. В этом случае возможна реализация процедур синтеза оптимальных конструктивных форм и структур с последующей параметрической оптимизацией, процедур изменения вида и числа компонентов вектора P , исключения и введения границ $u(x)$, для которых определены функции распределения материала.

Эволюционное моделирование

Решение проблемы синтеза формы и структуры конструкций может быть сопоставлено с моделированием поведения некоторого «разумного организма», решающего задачу прогнозирования. Решение подобных задач может быть основано на методе эволюционного моделирования, являющегося одним из направлений создания искусственного интеллекта [10, 11].

Эволюция состоит в усовершенствовании алгоритма (например, управления процессом проектирования) или модели (например, проектируемого объекта). Эволюция основана на порождении «модели по-

томка» и ее сопоставлении с «моделью родителя». Если имеет место улучшение состояния, изменение закрепляется — «потомок» выживает и переходит в категорию «родителя». Процесс заканчивается вырождением, когда «потомки» повторяют «родителей» или когда при заданных условиях дальнейшее развитие невозможно. В частном случае применения эволюционного моделирования при проектировании конкретных изделий генерация каждого последующего варианта модели осуществляется как путем целенаправленного усовершенствования, так и путем изменения структуры существующего варианта. Таким образом, предполагается возможность формального построения модели проектируемого объекта и ее формального многократного преобразования. Решение задачи синтеза с этой точки зрения рассматривается как моделирование поведения проектировщика, последовательно прорабатывающего различные варианты проектируемого изделия.

Для моделирования эволюции необходимо выбрать вид математического представления проектируемого объекта, претерпевающего изменения. Предполагая решение задачи синтеза формы конструкций по заданным воздействиям, например, тепловым или механическим, целесообразно отчасти воспользоваться для математического представления объекта моделью клеточного автомата [12].

Клеточные автоматы являются дискретными динамическими системами. Их поведение полностью определяется в терминах локальных зависимостей, как и большого класса непрерывных динамических систем, определенных уравнениями в частных производных. В этом смысле клеточные автоматы являются дискретными аналогами физического понятия поля. Пространство представлено сеткой, каждая ячейка или клетка которого характеризуется заданным набором данных. Законы существования выражаются определенным набором соотношений, позволяющих для каждой клетки на каждом шаге вычислить ее новое состояние по состоянию ее близких соседей. Законы системы в данном случае являются локальными и всюду одинаковыми. Клеточные автоматы находят применение для моделирования различных физических процессов, таких как диффузии, теплопередачи, течения жидкостей и газов и т. д. Отметим методологическую ценность идеи выбора некоторой области с предопределенными свойствами, обеспечивающими моделирование развития структуры или процесса.

Однако клеточные автоматы являются весьма специализированными параллельными вычислительными устройствами, для которых, например, число возможных состояний каждой клетки регулярного клеточного поля конечно, в связи с чем они фактически не позволяют моделировать физические процессы при сложных граничных условиях. Необходимо построение модели развивающейся структуры или конструктивной формы. Модель должна обеспечивать представление развития или многократного преобразования исследуемого объекта.

Обычно математическая модель представляется в виде системы уравнений, описывающих состояние

объекта. В частности, состояние материала НК может быть представлено описанием в виде уравнений в частных производных. В качестве примера можно привести задачи исследования напряженно-деформированного состояния конструкций при заданных механических воздействиях, исследования температурных режимов, режимов электростатики и магнитостатики. Численные методы решения уравнений в частных производных получили широкое распространение и интенсивно развиваются в рамках систем автоматизированного проектирования (см., например, [3, 4]).

Однако распространенные методы решения задач, описываемых уравнениями математической физики, предполагают выбор фиксированной области решения или области определения искомой функции и, следовательно, обеспечивают решение задачи анализа или исследования заданной конструктивной формы. При этом не обеспечивается возможность оперативного изменения и разделения областей решения различной физической природы НК [13]. В этом случае получаются результаты частного решения, которые могут составлять основу для исследования НК как сложной системы при незадаваемых ограничениях на модули высшего уровня иерархии. Определение лучшей структуры и лучших значений параметров возможно при многократном исследовании решений, каждое из которых требует соответствующего выбора переменных проектирования и структуры проекта НК как сложной системы в целом. Следовательно, решение задачи поиска или вычисления оптимальной конструктивной формы проектируемого изделия предполагает необходимость исследования большого числа вариантов его возможного исполнения и соответственно многократного решения краевых задач, отличающихся конфигурацией области решения, начальными и граничными условиями.

Предполагая возможность автоматического синтеза структуры конструкций, необходимо обеспечить формальное решение задач композиции и декомпозиции конструктивных форм, что соответствует как объединению, так и разделению областей решения краевых задач [14]. При этом решение задач вычисления или синтеза формы НК по заданным эксплуатационным воздействиям на основе методов эволюционного моделирования возможно при автоматическом формировании разрешающих уравнений, вычислении искомой функции, исследовании решения и, возможно, преобразовании области решения.

Модель развития формы НК может быть построена на основе определения области проектирования как области возможного формирования и решения краевых задач. Предполагается, что область проектирования охватывает область решения краевой задачи. Возможные преобразования могут приводить как к выделению нескольких отличных от исходной областей решения, так и к последующему объединению выделенных. При этом реализуется принцип композиции и декомпозиции, являющийся необходимым условием решения задач синтеза НК по заданным воздействиям и ограничениям. С математической точки зрения модель развития формы конструкции обеспе-

чивает многократное целенаправленное формирование границ области, определение искомой функции по результатам исследования решений краевых задач. С физической точки зрения модель развития предполагает многократное целенаправленное наращивание, удаление или перераспределение материала некоторой исходной формы или заготовки. Заготовка, как правило, примитивна по форме, может быть явно избыточной или недостаточной по объему используемого материала.

Преобразование или изменение формы конструкции с целью ее улучшения выполняется по результатам исследования поведения НК при заданных воздействиях, исследования распределения нагрузки по объему материала. В зависимости от предъявляемых эксплуатационных требований, технологических ограничений преобразование формы может осуществляться с целью снижения массы конструкции, обеспечения необходимой жесткости или прочности при заданном объеме используемого материала, предотвращения возможного разрушения или потери работоспособности. Величина нагрузки в локальной области оценивается путем сопоставления значения некоторой физической величины, например энергии деформации или энергии формоизменения, характеризующей состояние материала при заданных воздействиях, и предельно допустимого значения той же величины, полученного по результатам испытаний исследуемого материала. В общем случае при заданных внешних воздействиях нагрузка по объему материала распределена неравномерно. При этом преобразование формы целесообразно выполнять с целью выравнивания распределения нагрузки по объему материала.

Используя представление формы конструкции в виде совокупности взаимосвязанных «пустых» и «заполненных материалом» элементов объема, очевидно, ее можно преобразовать путем «введения материала» в «пустые» элементы объема, «удаления материала» из «заполненных» и перераспределения материала, т. е. «введения» материала, «удаленного» из «заполненных» элементов объема, в «пустые» элементы. В первом случае преобразование приводит к уменьшению массы конструкции, во втором — к ее увеличению. При перераспределении материала масса конструкции не изменяется.

Пусть выбрана прямоугольная область проектирования со сторонами l_1, l_2

$$G=(0\leq x\leq l_1, 0\leq y\leq l_2)$$

и прямоугольными элементами объема, размеры которых h_{xi}, h_{yj}, h_z определяются неравношаговой сеткой ω_h и толщиной пластины h_z . В этом случае

$$l_1 = \sum_{i=1}^N h_{xi}, l_2 = \sum_{j=1}^M h_{yj}.$$

В области проектирования имеем $D=\{d_1, \dots, d_{Ne}\}$, $N_e=NM$ элементов объема. Если $P=\{p_1, \dots, p_{Ne}\}$ — признаки наличия материала и $p_e \in \{0, 1\}$, можно выделить подмножества «пустых» R и «заполненных материалом» M элементов объема:

$$M = \{d_e/p_e = 1\}; R = \{d_e/p_e = 0\};$$

$$m(M) + m(R) = NM = N_e.$$

Изменение формы и (или) структуры конструкции на k -м шаге преобразования при «введении материала» соответствует перераспределению:

$$m(M_k) = m(M_{k-1}) + m(\bar{M}_{k-1});$$

$$m(R_k) = m(R_{k-1}) - m(\bar{R}_{k-1}).$$

Здесь $m(M_k)$, $m(R_k)$ и $m(M_{k-1})$, $m(R_{k-1})$ — число «заполненных материалом» и «пустых» элементов объема на шаге преобразования k и $k-1$, соответственно; $m(\bar{M}_{k-1})$ и $m(\bar{R}_{k-1})$ — число «пустых» элементов, «заполняемых материалом», и число «заполненных» элементов, материал из которых «удаляется» на шаге преобразования $k-1$.

Аналогично, «удаление материала» соответствует соотношениям

$$m(R_k) = m(R_{k-1}) + m(\bar{R}_{k-1});$$

$$m(M_k) = m(M_{k-1}) - m(\bar{M}_{k-1}).$$

При перераспределении материала на шаге преобразования $k-1$ материал «вводится» в $m(\bar{M}_{k-1})$ элементов объема и из $m(\bar{R}_{k-1})$ элементов «удаляется».

По объемам «вводимого» $m(\bar{M}_{k-1})$ и «удаляемого» $m(\bar{R}_{k-1})$ материала устанавливаются различные условия развития или совершенствования конструкций.

Вычисление формы конструкции по заданным воздействиям можно выполнить путем многократного целенаправленного преобразования некоторой исходной формы или заготовки. При вычислении формы путем многократного удаления материала выбирается избыточная по объему материала заготовка, при введении или наращивании — объем материала заготовки меньше объема материала НК. При перераспределении материала объема материала заготовки и конечной формы конструкции равны. Если цель преобразования состоит в выравнивании распределения нагрузки по объему материала, то, очевидно, удалению подлежит материал, характеризующийся минимальной нагрузкой при заданных воздействиях. При преобразовании недостаточной по объему материала заготовки необходимо «вводить» материал в «пустые» элементы объема НК, прилегающие к граням граничных элементов, несущих максимальную нагрузку.

Предлагаемый метод представляется целесообразным для создания алгоритмов и программ синтеза формы и структуры конструктивных элементов и использования в качестве программного модуля систем автоматизированного проектирования несущих конструкций радиоэлектронных средств.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Хог Э., Чой К., Комков В. Анализ чувствительности при проектировании конструкций.— М.: Мир, 1988.
2. Кофанов Ю. Н. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности радиоэлектронных средств.— М.: Радио и связь, 1991.
3. Тартаковский А. М. Математическое моделирование в конструировании РЭС.— Пенза: Пенз. гос. техн. ун-т, 1995.
4. Черненко В. Д. Моделирование процессов механико-прочностного проектирования конструкций радиоэлектронных средств.— СПб: Политехника, 2003.
5. Хог Э., Арора Я. Прикладное оптимальное проектирование. Механические системы и конструкции.— М.: Мир, 1983.
6. Баничук Н. В. Введение в оптимизацию конструкций.— М.: Наука, 1986.
7. Голубев А. В. Параметрический синтез многоуровневых конструкций радиоэлектронных средств.— СПб: СПб ГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 1998.
8. Черных К. Ф. Нелинейная теория упругости в машиностроительных расчетах.— Л.: Машиностроение, 1986.
9. Чернышев А. А. Теоретические основы конструирования и надежности радиоэлектронных средств.— М.: Радио и связь, 1998.
10. Автоматизация поискового конструирования (искусственный интеллект в машинном проектировании) / А. И. Половинкин, Н. К. Бобков, Г. Я. Буш и др.— М.: Радио и связь, 1981.
11. Искусственный интеллект: применение в интегрированных производственных системах / Под ред. Э. Кьюсиака.— М.: Машиностроение, 1991.
12. Исследование операций. Т. 1, 2 / Под ред. Дж. Моудера, С. Элмаграби.— М.: Мир, 1981.
13. Шерин К. Ю. Синтез типоразмерных рядов базовых несущих конструкций радиоэлектронных средств АСУ.— СПб: СПб ГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2000.
14. Лутченков Л. С. Автоматизированное проектирование несущих конструкций радиоэлектронных средств.— М.: Радио и связь, 1991.

в портфеле редакции

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

- Особенности проектирования дискретных СВЧ-фазовращателей с переключаемыми каналами. (Украина, г. Львов)
- Современное состояние и основные тенденции развития волноводных излучателей на основе соединений A^3B^5 . (Узбекистан, г. Ташкент)
- Твердотельные датчики специализированных информационно-измерительных сетей. (Украина, г. Одесса)
- Проектирование реконфигурируемых систем на ПЛИС. (Украина, г. Киев)
- Программируемый блок управления для промышленного лазера. (Украина, г. Черновцы)



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

Д. т. н. В. М. НИКОЛАЕНКО, к. т. н. О. В. НИКОЛАЕНКО,
А. Ю. ВЕНЕДИКТОВ

Украина, Одесский национальный политехнический университет,
СПКБ "Дискрет"
E-mail: sas@tekom.odessa.ua

Дата поступления в редакцию
18.09 2006 г.

Оппонент д. т. н. В. В. ДАНИЛОВ
(ДонНУ, г. Донецк)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОНДА С ЗАПИРАЮЩИМ ПОТЕНЦИАЛОМ В ПРОЕКТИРОВАНИИ УСТРОЙСТВ ТЕЛЕМЕТРИИ И УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрены особенности построения термофункциональной гипермодели зонда с запирающим потенциалом и адаптация модели к форме, удобной при проектировании устройств телеметрии и управления.

В плазменных исследованиях околоземного и межпланетного пространства широко используются электронные устройства телеметрии и управления космическими объектами. К функциональным возможностям электронной аппаратуры, содержащей устройства данного класса, предъявляются достаточно жесткие требования по их температурной устойчивости.

Процесс проектирования таких устройств требует всестороннего анализа свойств первичных преобразователей параметров плазмы (ППП) на основе моделирования функциональных характеристик разрабатываемой аппаратуры в среде схемотехнических САПР (СхСАПР). Для проектирования в этой среде необходимо предварительно сформировать модели ППП, которые учитывали бы нелинейность их характеристик, динамические свойства. Кроме того, желательным учетом в них влияние температуры T ($T \in [T_{\min}, T_{\max}]$, где T_{\min} , T_{\max} — минимальное и максимальное ее значение). Последнее в значительной мере определяет точностные показатели создаваемых устройств [1, 2].

К сожалению, имеющиеся модели ППП построены на основе традиционных принципов физического моделирования, ограниченно учитывают вышеперечисленные особенности датчиков и практически не включают функционального описания действия температуры на характеристики ППП.

Таким образом, для создания температуроустойчивой электронной аппаратуры, предназначенной для проведения исследований космического пространства, требуется разработка теоретических и прикладных аспектов эффективного моделирования ППП с учетом влияния температуры на их функциональные свойства.

Рассмотрим особенности формирования указанных моделей, базируясь на преобразователях параметров плазмы типа зонда с запирающим потенциа-

лом [2]. Конструкция таких ППП упрощенно изображена на **рис. 1** (отдельные дополнительные сетки, соединенные с корпусом прибора, не указаны).

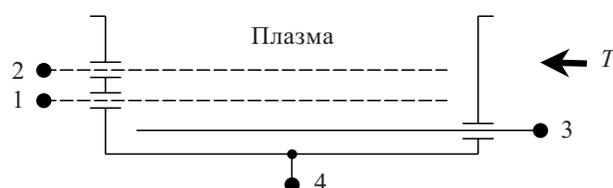


Рис. 1. Конструкция преобразователя параметров плазмы типа зонда с запирающим потенциалом:
1 — супрессорная сетка; 2 — управляющая сетка; 3 — коллектор;
4 — корпус ППП

Наиболее целесообразным подходом в плане учета вышеперечисленных свойств исследуемых ППП является термофункциональное гипермоделирование [3], применение которого в данном контексте включает следующие этапы.

В силу конструкции ППП, приведенной на рис. 1, форма термофункциональной гипермодели (ТФГМ) ППП примет вид, показанный на **рис. 2**, где сохранена нумерация полюсов ППП и введено обозначение напряжения H_r ($r = 1, 3$).

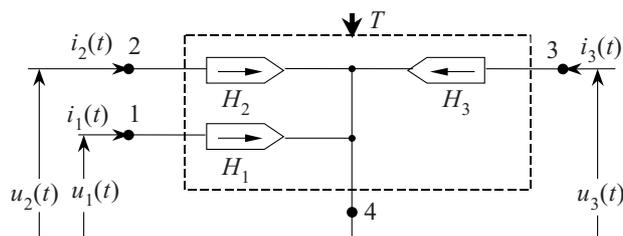


Рис. 2. Термофункциональная гипермодель ППП

Для определения описания гипергенераторов необходимо провести тестирование ППП в соответствии со схемой, изображенной на **рис. 3**. Здесь генераторы J_r и g_r проводимости предназначены для подачи на полюсы ППП тестовых сигналов вида

$$i_{tr}(t) = I_{tr} 1(t), \quad I_{tr} \in [I_{r \min}, I_{r \max}], \quad (1)$$

где I_{tr} — амплитуда r -го тестового сигнала;
 $I_{r \min}, I_{r \max}$ — минимальное и максимальное его значения;
 $1(t)$ — единичная функция [4, с. 790];
 $t > 0$ — произвольный момент времени.

Работа выполнена в рамках Общегосударственной космической программы Украины на 2003—2007 гг.

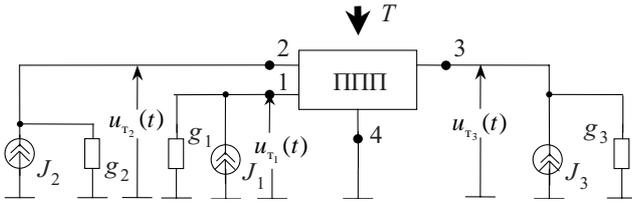


Рис. 3. Схема тестирования ППП

Для формирования описания гипергенераторов ТФГМ ППП + H_r (рис. 2) необходимо обеспечить полный перебор ситуаций по всем переменным

$$T \in [T_{\min}, T_{\max}], I_{tr} \in [I_{r\min}, I_{r\max}], \quad (2)$$

а именно, требуется реализовать следующие варианты:

$$T = T_{\min}, I_{tr} = I_{r\min};$$

$$T = T_{\min}, I_{t1} = I_{1\min}, I_{t2} = I_{2\min}, I_{t3} = I_{3\min} + \Delta I_3; \quad (3)$$

$$\dots\dots\dots$$

$$T = T_{\min}, I_{t1} = I_{1\min}, I_{t2} = I_{2\min}, I_{t3} = I_{3\min} + m_3 \Delta I_3;$$

$$\dots\dots\dots$$

$$T = T_{\min} + m_0 \Delta T, I_{t1} = I_{1\min} + m_1 \Delta I_1;$$

$$I_{t2} = I_{2\min} + m_2 \Delta I_2, I_{t3} = I_{3\min} + m_3 \Delta I_3,$$

где $\Delta T, \Delta I_r$ — величины приращения соответствующих переменных;

$$T_{\min} + m_0 \Delta T = T_{\max};$$

$$I_{r\min} + m_n \Delta I_r = I_{r\max};$$

m_n — количество приращений по n -й переменной ($n = \overline{0, 3}$).

В общем случае в процессе реализации вариантов (2), (3) дополнительно следует изменять параметры $\tilde{p} = \{p_1, \dots, p_m\}$, характеризующие состояние плазмы [2]. При этом для построения ТФГМ производится контроль откликов ППП $u_{tr}(t)$ (рис. 3) на тестовые воздействия (1). Аппроксимация этих откликов позволяет получить описание переходных характеристик моделируемого объекта в виде некоторых нелинейных, в общем случае обобщенных, функций [3, с. 20]

$$u_{tr}(t) = \Psi_r(I_{t1}, I_{t2}, I_{t3}, \tilde{p}, T, t). \quad (4)$$

Далее на основе переходных характеристик (4) посредством специальных методов [3] формируется описание гипергенераторов ТФГМ ППП H_r в следующей форме:

$$H_r \equiv u_r(t) = \frac{d}{dt} \int_0^t F_{1r}[\tilde{z}_1(\tau_1), \tilde{p}, T, t - \tau_1] d\tau_1, \quad (5)$$

где $F_{1r}[\cdot]$ — нелинейная функция, базирующаяся на переходных характеристиках (4); $\tilde{z}_1(\tau_1) = \{z_{11}(\tau_1), \dots, z_{1d}(\tau_1)\}$ — вектор операторов первого уровня типа операторов переходной реакции (ОПР) [3, с. 61]

$$z_{1l}(\tau_1) = \frac{d}{d\tau_1} \int_0^{\tau_1} F_{2l}[\tilde{z}_2(\tau_2), \tilde{p}, T, \tau_1 - \tau_2] d\tau_2,$$

$$(l = \overline{1, d}), \quad (6)$$

где d — количество операторов соответствующего уровня.

В описании (6) $\tilde{z}_2(\tau_2)$ является также вектором операторов типа ОПР второго уровня. Аналогично соотношению (6) рассматриваются векторы $\tilde{z}_3(\tau_3), \tilde{z}_4(\tau_4), \dots, \tilde{z}_{q-2}(\tau_{q-2})$ для соответствующих операторных уровней. Для вектора $\tilde{z}_{q-1}(\tau_{q-1})$ имеем

$$z_{(q-1)l}(\tau_{q-1}) = \frac{d}{d\tau_{q-1}} \int_0^{\tau_{q-1}} F_{ql}[\tilde{i}(\tau_q), \tilde{p}, T, \tau_{q-1} - \tau_q] d\tau_q, \quad (7)$$

где $\tilde{i}(\tau_q) = \{i_1(\tau_q), i_2(\tau_q), i_3(\tau_q)\}$ — токи полюсов ТФГМ ППП.

Непосредственное применение рассмотренной методики (1)–(7) в полном объеме сводится к весьма громоздкой процедуре, требующей значительных временных, вычислительных и аппаратных затрат. Поэтому воспользуемся рядом известных положений, определенных традиционными экспериментальными методами.

Так, для зонда с запирающим потенциалом можно использовать сепарабельное представление динамических и статических свойств [2] в соотношениях (4). Кроме того, для этих ППП влияние вектора \tilde{p} на динамику достаточно ограничено.

В силу отмеченных особенностей определение переходных характеристик (4) и построение представлений (5)–(7) удобно проводить в два этапа, на первом из которых принимается $\tilde{p} = \tilde{0}$ ($p_1 = 0, \dots, p_m = 0$) и определяются зависимости (4) на основе тестовых сигналов (1) без учета статической составляющей.

Проведенные исследования показали, что для зонда с запирающим потенциалом имеют место следующие переходные характеристики:

$$\begin{aligned} u_{t1}(t) &= \\ &= I_{t1} \frac{1(t)}{S_1(I_{t1}, T)} \left(1 - \exp \left[- \frac{S_1(I_{t1}, T)}{S_2(I_{t1}, I_{t2}, I_{t3}^*, T)} t 1(t) \right] \right); \\ u_{t2}(t) &= \\ &= I_{t2} \frac{1(t)}{N_1(I_{t2}, T)} \left(1 - \exp \left[- \frac{N_1(I_{t2}, T)}{N_2(I_{t1}, I_{t2}, I_{t3}^*, T)} t 1(t) \right] \right); \quad (8) \\ u_{t3}(t) &= \\ &= I_{t3}^* \frac{1(t)}{K_1(I_{t3}^*, T)} \left(1 - \exp \left[- \frac{K_1(I_{t3}^*, T)}{K_2(I_{t1}, I_{t2}, I_{t3}^*, T)} t 1(t) \right] \right), \end{aligned}$$

где $S_i(\cdot), N_i(\cdot), K_i(\cdot)$ ($i = 1, 2$) — некоторые нелинейные функции; I_{t3}^* — амплитуда тестового тока $i_3(t)$ (1) без учета статической составляющей, зависящей от вектора \tilde{p} .

Дополнительные исследования и, в частности, тестирование ППП рассматриваемого типа импульсными сигналами вида

$$i_{tr}(t) = I_{tr} [1(t) - 1(t - \zeta)], I_{tr} \in [I_{i\min}, I_{i\max}] \quad (9)$$

позволили определить структуру математического представления гипергенераторов (рис. 2) (5)–(7). (Здесь I_{tr} — амплитуда r -го импульсного сигнала, а $I_{i\min}, I_{i\max}$ — минимальное и максимальное его значения; $\zeta > 0$ — длительность импульсных сигналов.)

Эти математические представления получены на основе метода частных функций [3] и могут быть описаны следующим образом:

$$H_r \equiv u_r(t) = \frac{d}{dt} \int_0^t F_{1r}[z_{11}(\tau_1), z_{12}(\tau_1), T, t - \tau_1] d\tau_1, \quad (10)$$

где функция $F_{1r}[\dots]$ имеет вид

$$F_{1r}[z_{11}(\tau_1), z_{12}(\tau_1), T, t - \tau_1] = \exp[-z_{11}(T, \tau_1)] z_{12}(T, \tau_1) 1(t - \tau_1). \quad (11)$$

Операторы первого уровня, входящие в описание (11), представимы соотношениями

$$z_{11}(T, \tau_1) = \frac{d}{d\tau_1} \int_0^{\tau_1} \frac{f_{1r}[i_r(\tau_2), T]}{f_{2r}[i_1(\tau_2), i_2(\tau_2), i_3^*(\tau_2), T]} (\tau_1 - \tau_2) d\tau_2; \quad (12)$$

$$z_{12}(T, \tau_1) = \frac{d}{d\tau_1} \int_0^{\tau_1} F_{2r}[z_2(\tau_2), i_1(\tau_2), i_2(\tau_2), i_3^*(\tau_2), T, \tau_1 - \tau_2] d\tau_2, \quad (13)$$

где $f_{11}(\cdot) = S_1(\cdot)$; $f_{12}(\cdot) = N_1(\cdot)$; $f_{13}(\cdot) = K_1(\cdot)$; $f_{21}(\cdot) = S_2(\cdot)$; $f_{22}(\cdot) = N_2(\cdot)$; $f_{23}(\cdot) = K_2(\cdot)$.

Функция $F_{2r}[\dots]$ в выражении (13) описывается следующим образом:

$$F_{2r}[z_2(\tau_2), i_1(\tau_2), i_2(\tau_2), i_3^*(\tau_2), T, \tau_1 - \tau_2] = \frac{i_r(\tau_2)}{f_{2r}[i_1(\tau_2), i_2(\tau_2), i_3^*(\tau_2), T]} \exp[z_{2r}(T, \tau_2)] (\tau_1 - \tau_2), \quad (14)$$

где оператор второго уровня $z_{2k}(\cdot)$ имеет вид

$$z_{2r}(T, \tau_2) = \frac{d}{d\tau_2} \int_0^{\tau_2} \frac{f_{1r}[i_r(\tau_3), T]}{f_{2r}[i_1(\tau_3), i_2(\tau_3), i_3^*(\tau_3), T]} (\tau_2 - \tau_3) d\tau_3, \quad (15)$$

Подстановка выражений (11)—(15) в формулу (10) дает описание гипергенераторов в следующей форме:

$$H_r \equiv u_r(t) = \frac{d}{dt} \int_0^t 1(t - \tau_1) \times \left\{ \exp \left[- \frac{d}{d\tau_1} \int_0^{\tau_1} \frac{f_{1r}[i_r(\tau_2), T]}{f_{2r}[i_1(\tau_2), i_2(\tau_2), i_3^*(\tau_2), T]} (\tau_1 - \tau_2) d\tau_2 \right] \times \left(\frac{d}{d\tau_1} \int_0^{\tau_1} \frac{i_r(\tau_2)}{f_{2r}[i_1(\tau_2), i_2(\tau_2), i_3^*(\tau_2), T]} (\tau_1 - \tau_2) \times \exp \left[\frac{d}{d\tau_2} \int_0^{\tau_2} \frac{f_{1r}[i_r(\tau_2), T]}{f_{2r}[i_1(\tau_3), i_2(\tau_3), i_3^*(\tau_3), T]} (\tau_2 - \tau_3) d\tau_3 \right] d\tau_2 \right) \right\} \times d\tau_1. \quad (16)$$

Соотношение (16) описывает гипергенераторы H_r (рис. 2) на основе операторов типа ОПР первого и второго уровня (5)—(7). Его можно упростить, вос-

пользовавшись правилом Лейбница для дифференцирования операторов, зависящих от параметров [4]. После указанного преобразования описание (16) принимает вид

$$H_r \equiv u_r(t) = \exp \left[- \int_0^t \frac{f_{1r}[i_r(\tau_1), T]}{f_{2r}[i_1(\tau_1), i_2(\tau_1), i_3^*(\tau_1), T]} d\tau_1 \right] \times \int_0^t \frac{i_r(\tau_1)}{f_{2r}[i_1(\tau_1), i_2(\tau_1), i_3^*(\tau_1), T]} \times \exp \left[\int_0^{\tau_1} \frac{f_{1r}[i_r(\tau_2), T]}{f_{2r}[i_1(\tau_2), i_2(\tau_2), i_3^*(\tau_2), T]} d\tau_2 \right] d\tau_1. \quad (17)$$

На втором этапе построения ТФГМ ППП (рис. 2) необходимо учесть влияние вектора \tilde{p} посредством статической составляющей тока $i_3(t)$, который представим следующим образом:

$$i_3(t) = i_3^*(t) + i_{30}(t), \quad (18)$$

где $i_{30}(t) = \Phi(\tilde{p}, u_{10}(t), u_{20}(t), u_{30}(t), T)$; $\Phi(\dots)$ — некоторая нелинейная функция, в общем случае зависящая от статических составляющих напряжения на полюсах ППП.

Традиционно для зонда с запирающим потенциалом функцию $\Phi(\dots)$ можно представить в виде [2, с. 46]

$$\Phi(\tilde{p}, u_{10}(t), u_{20}(t), u_{30}(t), T) = A(a, s, v, \theta) \times \sum_{\mu=1}^m M_{\mu} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}(x_{\mu}) + B(a_{\mu}, u_{20}, T) \right] + c, \quad (19)$$

- где a — коэффициент прозрачности управляющей сетки;
- s — площадь входного отверстия;
- v — параллельная составляющая скорости ионов;
- θ — угол, определяющий направленность ППП;
- m — количество ионных компонент;
- M_{μ} — концентрация ионов μ -го "сорта";
- a_{μ} — тепловая скорость ионов с массой m_{μ} ;
- c — фон.

Параметр x_{μ} определяется соотношениями

$$x_{\mu} = \begin{cases} (1/a_{\mu}) \left[v \cos \theta - \sqrt{2q(u_{20} + \varphi)/m_{\mu}} \right] & \text{при } u_{20} + \varphi \geq 0; \\ (1/a_{\mu}) v \cos \theta & \text{при } u_{20} + \varphi < 0, \end{cases} \quad (20)$$

- где q — заряд электрона;
- φ — потенциал корпуса.

Величина тепловой скорости ионов описывается формулой

$$a_{\mu} = \sqrt{2kT/m_{\mu}}, \quad (21)$$

где k — постоянная Больцмана.

Окончательно описание гипергенераторов ТФГМ ППП (рис. 2) с учетом выражений (17)—(21) можно представить следующим образом:

$$H_1 \equiv u_1(t) = \exp \left\{ - \int_0^t \frac{S_1[i_1(\tau_1), T]}{S_2[i_1(\tau_1), i_2(\tau_1), i_3(\tau_1) - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T]} d\tau_1 \right\} \times$$

$$\begin{aligned} & \times \int_0^t i_1(\tau_1) (S_2[i_1(\tau_1), i_2(\tau_1), i_3(\tau_1) - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T)]^{-1} \times \\ & \times \exp \left\{ \int_0^{\tau_1} S_1[i_1(\tau_2), T] (S_2[i_1(\tau_2), i_2(\tau_2), i_3(\tau_2) - \right. \\ & \left. - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T)]^{-1} d\tau_2 \right\} d\tau_1; \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} H_2 \equiv u_2(t) = & \exp \left\{ - \int_0^t \frac{N_1[i_1(\tau_1), T]}{N_2[i_1(\tau_1), i_2(\tau_1), i_3(\tau_1) - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T]} d\tau_1 \right\} \times \\ & \times \int_0^t i_2(\tau_1) (N_2[i_1(\tau_1), i_2(\tau_1), i_3(\tau_1) - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T)]^{-1} \times \\ & \times \exp \left\{ \int_0^{\tau_1} N_1[i_1(\tau_2), T] (N_2[i_1(\tau_2), i_2(\tau_2), i_3(\tau_2) - \right. \\ & \left. - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T)]^{-1} d\tau_2 \right\} d\tau_1; \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} H_3 \equiv u_3(t) = & \exp \left\{ - \int_0^t \frac{K_1[i_3(\tau_1) - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T]}{K_2[i_1(\tau_1), i_2(\tau_1), i_3(\tau_1) - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T]} d\tau_1 \right\} \times \\ & \times \int_0^t [i_3(\tau_1) - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T)] (K_2[i_1(\tau_1), i_2(\tau_1), i_3(\tau_1) - \\ & - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T)]^{-1} \exp \left\{ \int_0^{\tau_1} K_1[i_3(\tau_2) - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T] \times \right. \\ & \left. \times (K_2[i_1(\tau_2), i_2(\tau_2), i_3(\tau_2) - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T)]^{-1} d\tau_2 \right\} d\tau_1, \end{aligned} \quad (24)$$

где $u_{20} = u_{20}(t)$; $\Phi(\dots)$ соответствует выражению (19).

В некоторых случаях непосредственное применение описаний ТФГМ ППП в форме (22)—(24) в среде СхСАПР вызывает определенные затруднения. Поэтому в таких ситуациях целесообразно представлять гипермодели в элементном базисе используемой СхСАПР, т. е. адаптировать их по форме на основе известных методов [3, с. 192] при сохранении полной адекватности ТФГМ. Для реализации этого подхода в данном случае достаточно продифференцировать соотношения (22)—(24) по t , что приведет к следующей системе уравнений:

$$\left. \begin{aligned} i_1(t) &= G_1[i_1(t), T]u_1(t) + C_1[i_1(t), i_2(t), i_3(t) - \\ & - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T] \frac{du_1}{dt}; \\ i_2(t) &= G_2[i_2(t), T]u_2(t) + C_2[i_1(t), i_2(t), i_3(t) - \\ & - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T] \frac{du_2}{dt}; \\ i_3(t) &= \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T) + G_3[i_3(t) - \\ & - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T]u_3(t) + C_3[i_1(t), i_2(t), i_3(t) - \\ & - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T] \frac{du_3}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

где $G_1[\dots]=S_1[\dots]$; $C_1[\dots]=S_2[\dots]$; $G_2[\dots]=N_1[\dots]$; $C_2[\dots]=N_2[\dots]$; $G_3[\dots]=K_1[\dots]$; $C_3[\dots]=K_2[\dots]$.

Этой системе уравнений соответствует адаптированная форма ТФГМ (рис. 4), которая полностью адекватна гипермодели ППП (рис. 2, соотношения (22)—(24)).

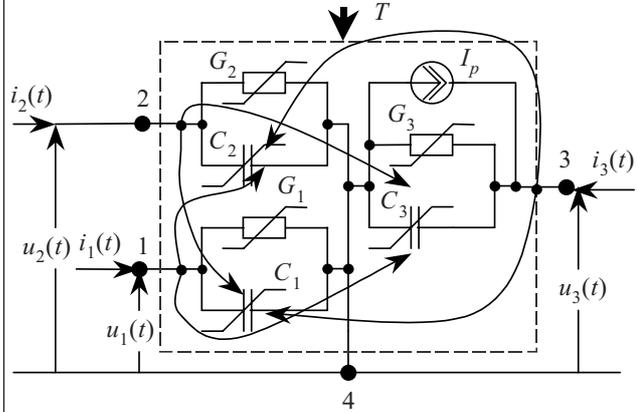


Рис. 4. Адаптированная форма ТФГМ ППП

Несмотря на то, что адаптация гипермодели основывается на формальных математических преобразованиях [3], в полученной форме (рис. 4) можно выявить конкретный физический смысл. Так, конденсаторы C_1, C_2, C_3 иллюстрируют наличие емкостей между полюсами ППП и его корпусом, но т. к. они управляются токами других полюсов (управление показано стрелками), то эти конденсаторы идентифицируют также емкостную связь полюсов между собой. Наличие токов утечки между полюсами ППП и его корпусом моделируется проводимостями G_1, G_2, G_3 . Источник тока I_p зависит от параметров плазмы \tilde{p} (19), в частности, от концентрации ионов заданных типов.

В практических случаях в качестве функций $S_i(\cdot), N_i(\cdot), K_i(\cdot)$ ($i = 1, 2$) удобно использовать полиномиальное представление [3, 4]. При этом возможна сепарабельная зависимость конденсаторов C_1, C_2, C_3 от токов полюсов ППП. Такое описание указанных конденсаторов позволяет получить следующее представление системы уравнений (25):

$$\left. \begin{aligned} i_1(t) &= G_1[i_1(t), T]u_1(t) + C_{11}[i_1(t), T] \frac{du_1}{dt} + \\ & + C_{12}[i_2(t), T] \frac{du_1}{dt} + C_{13}[i_3(t) - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T] \frac{du_1}{dt}; \\ i_2(t) &= G_2[i_2(t), T]u_2(t) + C_{21}[i_1(t), T] \frac{du_2}{dt} + \\ & + C_{22}[i_2(t), T] \frac{du_2}{dt} + C_{23}[i_3(t) - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T] \frac{du_2}{dt}; \\ i_3(t) &= G_3[i_3(t) - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T)] + \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T) + \\ & + C_{31}[i_1(t), T] \frac{du_3}{dt} + C_{32}[i_2(t), T] \frac{du_3}{dt} + C_{33}[i_3(t) - \\ & - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T] \frac{du_3}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Этой системе уравнений соответствует адаптированная форма ТФГМ ППП, изображенная на рис. 5. В этой форме наглядно представлена емкостная связь всех элементов ППП между собой, что иллюстрирует физическую интерпретацию ТФГМ ППП.

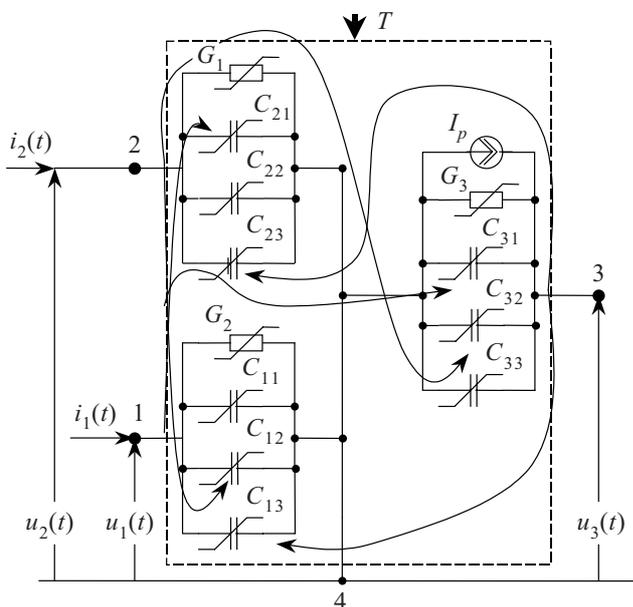


Рис. 5. Адаптированная форма ТФГМ ППП с сепарбельным представлением емкостей

Проверка адекватности ТФГМ ППП базируется на оценке отклонений выходных сигналов для заданных воздействий — как по параметрам \tilde{p} , так и по действующим напряжениям на сетках и коллекторе зонда с запирающим потенциалом.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что использование предложенных представлений (рис. 2, (22)—(24) и рис. 4, (25), рис. 5, (26)) позволяет при незначительных затратах обеспечить погрешность гипермодели ППП, не превышающую $\pm 10\%$.

В заключение отметим следующее.

Во-первых, предложенный подход достаточно универсален и может быть успешно применен при формировании термофункциональных гипермоделей преобразователей параметров плазмы других типов [1, 2].

Во-вторых, получаемые гипермодели в общем виде (рис. 2) и в адаптированной форме (рис. 4, 5)

представляют собой адекватное объединение соответственно математической и физической модели ППП. Первая из них в абстрактной форме, без конкретизации структуры и происходящих в ней процессов, описывает основные свойства моделируемого объекта. Вторая форма гипермодели учитывает конструкцию ППП и имеющиеся в ней связи и взаимные влияния, а также представляет объект моделирования в виде эквивалентной электрической схемы (рис. 4, 5).

В-третьих, в ТФГМ учтены все динамические особенности и нелинейные свойства моделируемого объекта, а также влияние на них температуры. При этом качество отображения указанных особенностей и свойств определяется параметрами реализации тестовых сигналов (1), точностью регистрации откликов и погрешностью аппроксимации переходных характеристик (4), что позволяет отказаться от специальных индивидуальных измерительных процедур и дополнительных оригинальных методик обработки экспериментальных данных.

В-четвертых, ТФГМ ППП общего вида (рис. 2) позволяет проводить моделирование функциональных характеристик первичных и вторичных преобразователей информации устройств телеметрии и управления в процессе их проектирования в средах систем символьной математики. А адаптированная форма ТФГМ ППП может успешно использоваться для тех же целей в средах СхСАПР. При этом на основе СхСАПР можно проводить как функциональную, так и схемотехническую разработку указанных устройств с учетом влияния температуры.

И в-пятых, все вышеперечисленные проектные возможности ТФГМ ППП успешно использованы для создания температуроустойчивой электронной аппаратуры для исследования околоземного и межпланетного пространства.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Козлов О. В. Электрический зонд в плазме.— М.: Атомиздат, 1969.
2. Шувалов В. А. Моделирование взаимодействия тел с ионосферой.— Киев: Наукова думка, 1995.
3. Николаенко В. М. Фактор-функциональные гипермоделирование нелинейных электронных объектов.— Одеса: Фотосинтетика, СПД Хавроненко В. В., 2004.
4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров.— М.: Наука, 1984.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем: В 2 т.— М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006.— Т. 1: Королев М. А., Крупкина Т. Ю., Ревелева М. А. Технологические процессы изготовления кремниевых интегральных схем и их моделирование.— 356 с., ил.

В учебном пособии рассматриваются вопросы, связанные с разработкой, изготовлением и моделированием кремниевых интегральных микросхем. Особое внимание уделяется современным маршрутам изготовления СБИС, методам моделирования процессов и маршрутов, основам субмикронной технологии интегральных микросхем.

Для студентов старших курсов университетов соответствующего профиля, аспирантов и специалистов в области проектирования, технологии изготовления и применения интегральных микросхем.

И. В. ЯКОВЛЕВ, Ю. А. ДЕМЬЯНЕНКО, В. А. САНКИН,
Н. М. ЧИЖМА

Украина, г. Киев, Научно-производственное предприятие "Сатурн"
E-mail: Lab132@ukr.net

Дата поступления в редакцию
24.10 2006 г.

Оппонент к. ф.-м. н. С. Д. ВОТОРОПИН
(НИИПП, г. Томск)

ВХОДНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ РЛС С ЗАЩИТОЙ ОТ МОЩНОГО СИГНАЛА

Приведены результаты разработки маломощного усилителя диапазона частот 7,525...8,025 ГГц с защитой от мощного сигнала синхронной и несинхронной помехи с непрерывной мощностью до 7 Вт.

К входным устройствам радиолокационных станций (РЛС) предъявляются противоречивые требования — минимальный коэффициент шума и устойчивость к сигналу высокого уровня мощности. Поступление сигнала высокого уровня мощности на вход приемного устройства вызвано работой передатчика и приемника РЛС на общий антенно-фидерный тракт, т. е. возможно просачивание сигнала передатчика на вход приемника. Уровень просачивающегося импульсного сигнала может составлять десятки и даже сотни ватт. Это обстоятельство обуславливает необходимость использования защитного устройства (ограничителя), что в свою очередь увеличивает входные потери маломощного усилителя и суммарный коэффициент шума входного устройства.

Ниже приведены результаты разработки входного устройства для РЛС (маломощный усилитель с защитой — МШУЗ) диапазона частот 7,525...8,025 ГГц с защитой от мощного сигнала, эквивалентного непрерывной мощности 7 Вт.

Общий вид МШУЗ со снятой верхней крышкой приведен на рис. 1. Как видно из рисунка, в состав МШУЗ входят ограничитель, двухкаскадный маломощный усилитель и выключатель.

Ограничитель выполнен по балансной схеме на подложке из поликора толщиной 0,5 мм. Электрическая схема ограничителя приведена на рис. 2.

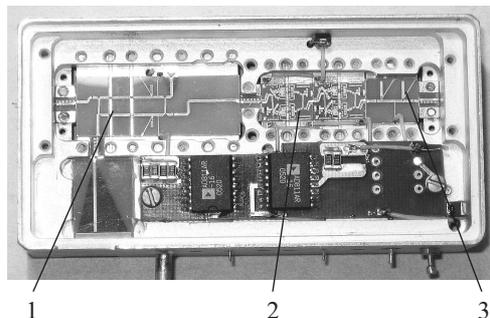


Рис.1. Общий вид маломощного усилителя с защитой:
1 — ограничитель; 2 — двухкаскадный маломощный усилитель;
3 — выключатель

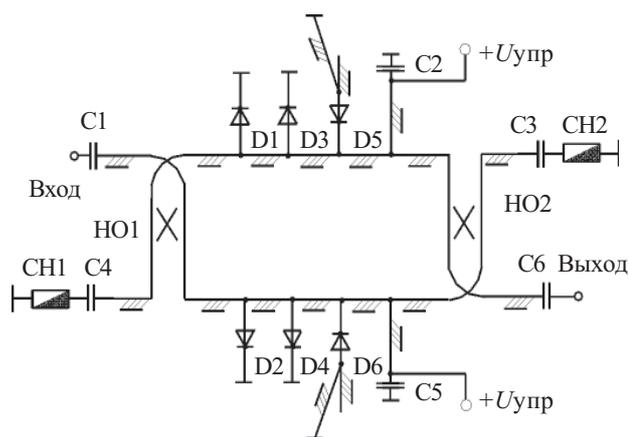


Рис. 2. Электрическая схема ограничителя

Во входных каскадах ограничителя (D1, D2) использованы ограничительные диоды CLA 4606-000 производства фирмы Skyworks (США), в последующих (D3, D4) — *pin*-диоды APD 0505-000 той же фирмы [1]. Для ускорения включения диодов при поступлении мощного сигнала использованы диоды с барьером Шоттки (D5, D6) УЗА102БЗ разработки и изготовления НПП "Сатурн". Основные электрические характеристики диодов приведены в табл. 1, где C_{JO} — емкость диода при нулевом смещении, RS_{10} — активное сопротивление диода при токе 10 мА, τ_1 — время жизни неосновных носителей заряда в *i*-области, R_{pmax} — максимально допустимая непрерывная падающая на диод мощность.

Таблица 1

Тип диода	C_{JO} , пФ	RS_{10} , Ом	τ_1 , нс	R_{pmax} , Вт
CLA 4606-000	0,2	2,0	10	3
APD 0505-000	0,1	2,0	20	...

Параметры ДБШ: граничная частота — не менее 0,8 ТГц, емкость диода при нулевом смещении 75—85 фФ.

Следует заметить, что схема ограничителя построена так, что он работает и по внешнему управляющему сигналу (режим бланкирования), и подавляет асинхронную помеху в отсутствие управляющего сигнала.

Маломощный усилитель состоит из двух каскадов, выполненных по балансной схеме на транзисторах TC 1201 [2]. Транзисторы этого типа удачно

сочетают низкий коэффициент шума и достаточно большую выходную мощность в линейном режиме. Параметры транзисторов TC 1201 на частоте 12 ГГц следующие:

- коэффициент шума — не более 0,5 дБ;
- связанный коэффициент усиления — не менее 12 дБ;
- выходная мощность при компрессии коэффициента усиления на 1 дБ (P_{-1}) — 22 дБм.

Для получения требуемого уровня подавления мощного входного сигнала в состав МШУЗ входит выключатель на *pin*-диодах типа 2A553A-3, имеющих емкость не более 0,02 пФ при отрицательном смещении -10 В и прямое сопротивление потерь при токе 20 мА не более 3 Ом. Электрическая схема выключателя приведена на **рис. 3**. Здесь VD1 и VD2 — диоды 2A553A-3. Для развязки цепей питания и СВЧ-цепей используются четвертьволновые короткозамкнутые линии и конденсаторы C1 – C3. Как и все узлы МШУЗ, выключатель выполнен на подложке из полупроводника толщиной 0,5 мм.

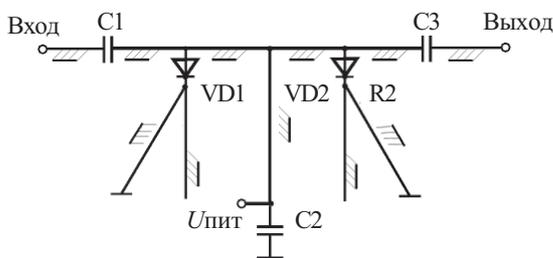


Рис. 3. Электрическая схема выключателя

Питание ограничителя осуществляется платой управления, выполненной на операционном усилителе AD 811 фирмы Analog Devices (США) [3]. Плата управления обеспечивает формирование импульса, питающего *pin*-диоды, с длительностью фронта около 10 нс. В состав МШУЗ входят также плата питания малошумящего усилителя и плата управления выключателем. Последняя аналогична плате управления ограничителем.

В процессе разработки ограничителя было проведено моделирование прохождения сигнала высокого уровня мощности через ограничитель. На вход ограничителя подавался непрерывный сигнал мощностью 8 Вт (39 дБм). На **рис. 4** приведены результаты расчета уровня выходного сигнала ограничителя в диапазоне рабочих частот.

Как видно из приведенных результатов, мощность выходного сигнала не превышает 15,58 дБм, что с учетом балансной схемы малошумящего усилителя составляет 12,58 дБм на транзистор TC1201 при максимально допустимой для него входной мощности 17 дБм.

Из полученных результатов также следует, что основная часть мощности (37,07 дБм или 5,093 Вт) отразится от диодов ограничителя и рассеется в нагрузке входного ответвителя.

Из всех узлов, входящих в состав МШУЗ, предварительную настройку проходил только малошумящий усилитель. Первый каскад малошумящего

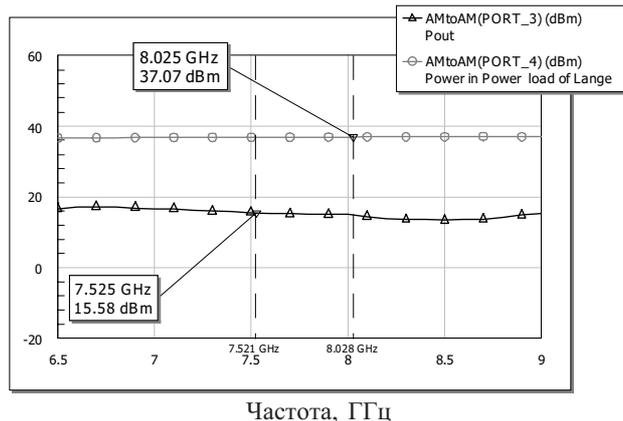


Рис. 4. Уровень сигнала на выходе и в нагрузке ограничителя:

- ▲ — мощность сигнала на выходе ограничителя, дБм;
 - — мощность сигнала в нагрузке входного ответвителя, дБм
- усилителя настраивался на минимум коэффициента шума, а второй — на максимум выходной мощности. Типичные параметры каскадов малошумящего усилителя приведены в **табл. 2**.

Таблица 2

Тип каскада	Коэф т ициент усиления, дБ	Коэф т ициент шума, дБ	P_{-1} , мВт
Малошумящий	12...13	0,8...0,9	—
Мощный	11...12	1,7...1,8	60...70

Измерения параметров МШУЗ партии из 10 образцов показали следующие результаты:

- диапазон рабочих частот — 7,525...8,025 ГГц;
- коэффициент усиления — не менее 20 дБ;
- коэффициент шума — не более 4,0 дБ;
- ослабление сигнала в режиме БЛАНК1 — не менее 50 дБ;
- ослабление сигнала в режиме БЛАНК2 — не менее 30 дБ;
- P_{-1} — 40...50 мВт.

Входное напряжение питания +12 В. Габаритные размеры МШУЗ 82,7×42×23,6 мм.

В дальнейшем планируется проведение испытаний МШУЗ на высоком уровне входной мощности.

Выводы

Использование имеющихся на мировом рынке комплектующих и комплектующих собственного изготовления позволило разработать гибридно-интегральный малошумящий усилитель диапазона частот 7,525...8,025 ГГц. Усилитель имеет коэффициент шума не более 4 дБ и защиту от мощного (до 7 Вт непрерывной мощности) сигнала синхронной или асинхронной помехи. Конструкция и методика проектирования могут быть использованы для разработки аналогичных устройств в других диапазонах частот — вплоть до миллиметрового диапазона.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. www.skyworksinc.com
2. www.transcominc.com.tw
3. www.analog.com

К. т. н. М. Д. СКУБИЛИН

Россия, Таганрогский гос. радиотехнический университет
E-mail: scubilin@hotmail.ru

Дата поступления в редакцию
24.07 2006 г.

Оппонент д. м. н. Л. С. ГОДЛЕВСКИЙ
(ОГМУ, г. Одесса)

ТЕСТЕР ТЕРАПЕВТА

Описывается портативный низкоэнергетичный электронный цифровой тестер, информирующий об артериальном давлении, частоте пульса и ритмичности сердечных сокращений.

Для оценки сердечной деятельности человека находят применение различные аналоговые и цифровые средства, зачастую громоздкие, энергоемкие и ограниченных функциональных возможностей.

В настоящей работе предложено решение задачи расширения функциональных возможностей средств контроля и диагностики сердечной деятельности человека с параллельным повышением их быстродействия, репрезентативности и достоверности результатов.

Предлагаемый тестер терапевта (рис. 1) включает в себя датчик импульса сокращений сердца (Д), триггер (Тр), генератор тактовых импульсов (ГИ), а также блоки контроля частоты пульса (БКЧП, рис. 2), ритмичности сердечных сокращений (БКАС [1, 2], рис. 3), артериального давления (БКАД [3], рис. 4) и предупредительной сигнализации (БПС, рис. 5).

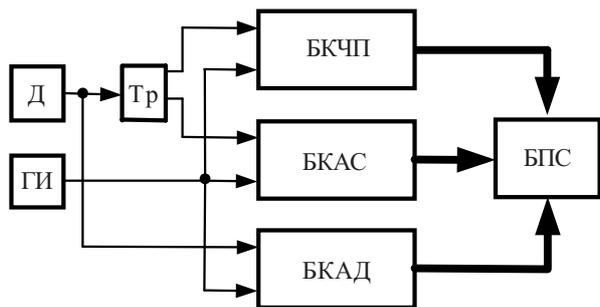


Рис. 1.

Тестер терапевта работает по блочному следующим образом. Датчик импульса сокращений сердца вмонтирован в шток соленоида или в упор обратного преобразователя (см. рис. 4). Ногтевая фаланга пальца человека О размещается в скобе обратного преобразователя на оси его соленоида, а генератор импульсов ГИ вырабатывает импульсы высокого потенциала с постоянной частотой f . В БКЧП с каждым импульсом с выхода генератора ГИ единичный потенциал последовательно пробегает все разряды регистра сдвига РС. За полный цикл работы регистра РС

однозначно определяется значение частоты пульса $N \approx f$, которое содержится в регистре памяти результата контроля Р и отображается индикатором И.

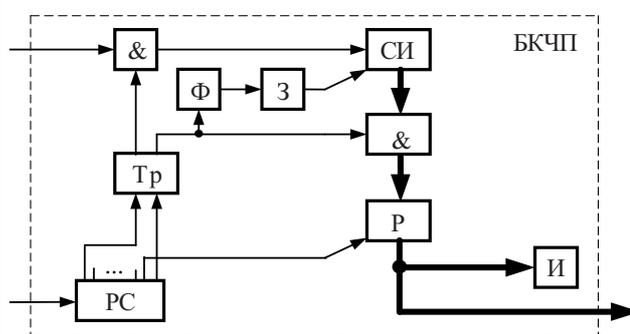


Рис. 2. Блок контроля частоты пульса:

& — элементы И; РС — кольцевой регистр сдвига; Тр — триггер; Ф — формирователь импульсов; З — элемент задержки; СИ — счетчик импульсов; Р — регистр памяти результата контроля (измерения); И — индикатор результата контроля (измерения)

В БКАС задатчиком Зд устанавливается значение порога срабатывания порогового элемента ПЭ. По переднему фронту каждого импульса высокого потенциала с выхода датчика Д и порогового элемента ПЭ состояние регистра сдвига РС изменяется. За полный цикл работы регистра сдвига РС в счетчиках СИ фиксируется число импульсов $N_{СИ1}$ и $N_{СИ2}$, пропорциональное периодам следования импульсов сокращения сердца T_1 и T_2 , соответственно. В арифметическом блоке АБ вычисляется значение $N_{АБ} = N_{СИ1}/N_{СИ2}$ при $N_{СИ1} < N_{СИ2}$ или $N_{АБ} = N_{СИ2}/N_{СИ1}$ при $N_{СИ1} > N_{СИ2}$. А так как $N_{СИ1} = T_1 f$ и $N_{СИ2} = T_2 f$, то $N_{АБ} = T_1/T_2$ или $N_{АБ} = T_2/T_1$. На выходе АБ генерируется значение $N_{АБ}$, т. е. в регистре Р результата контроля ритма сердца фиксируется относительный коэффициент ритмичности по каждой последовательности из четырех импульсов сердечных сокращений. Содержимое выходов регистра Р отображается индикатором И и является численной характеристикой ритмичности работы сердца.

В БКАД датчик Д по каждому импульсу сокращения сердца генерирует единственный импульс высокого потенциала, которым изменяется состояние выходов счетчика импульсов СИ дискретно во времени с периодом $T=1/f$, в результате чего состояние выхода ЦАП также изменяется, а следовательно, изменяется и значение тока I_y в катушке соленоида.

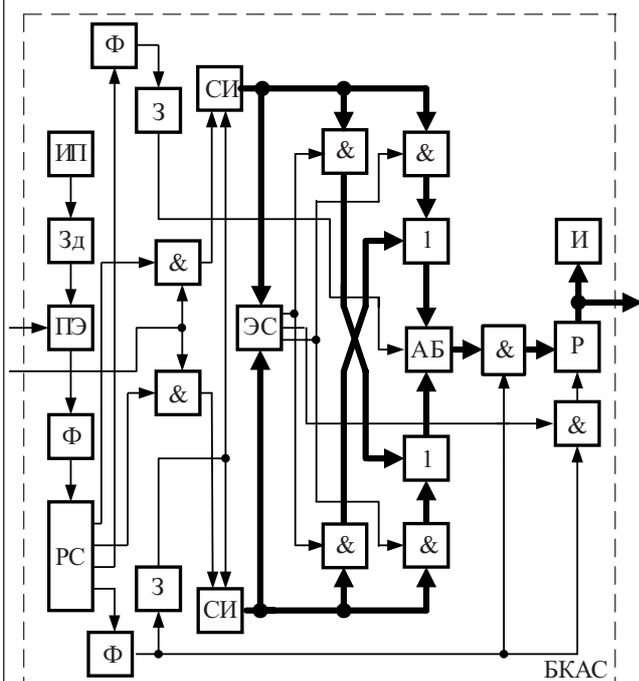


Рис. 3. Блок контроля ритмичности сердечных сокращений:

ИП — источник постоянного потенциала; Зд — датчик; ПЭ — пороговый элемент; Ф — формирователи импульсов; РС — регистр сдвига; З — элементы задержки; & — элементы И; СИ — счетчики импульсов; 1 — элементы ИЛИ; АБ — арифметический блок; Р — регистр памяти результата контроля (измерения); И — индикатор результата контроля

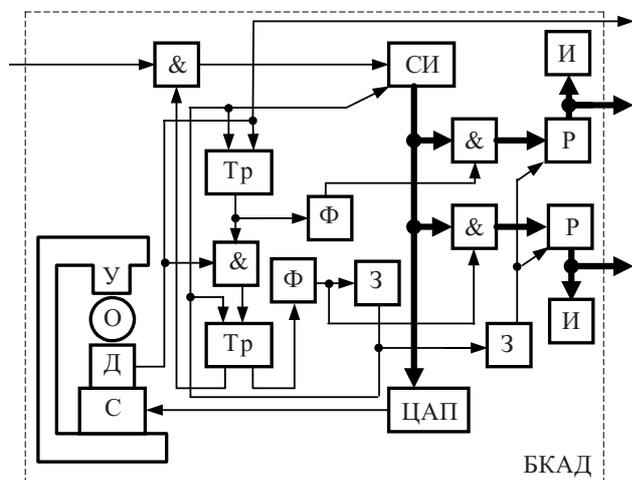


Рис. 4. Блок контроля артериального давления:

У и С — упор (магнитопровод) и соленоид обратного преобразователя; О — ногтевая фаланга; Д — датчик; & — элементы И; Тр — триггеры; Ф — формирователи импульсов; З — элементы задержки; СИ — счетчик импульсов; ЦАП — цифроаналоговый преобразователь; Р — регистры памяти результата контроля (измерения); И — индикаторы результата контроля

За полный цикл работы счетчика СИ пилообразно, от нуля до максимума (или наоборот), изменяется и положение катушки, мембраны и штока, пилообразно изменяется и сила в осевом направлении, в сторону упора. Расположенная между штоком и упором ногтевая фаланга О пальца человека подвергается

ся механическому воздействию по пилообразному во времени закону. При изменении тока в катушке соленоида С его сила F через шток воздействует на палец человека и создает давление $P(t)=F(t)/S$ (здесь S — площадь механического контакта с пальцем человека). По первому импульсу с выхода датчика Д при $P_a=P_{ав}=P_v(t) \neq 0$ ($P_a=P_{ан}=P_n(t) \neq 0$) содержимое счетчика СИ $N_{СИ} \equiv P_{ав}$ ($N_{СИ} \equiv P_{ан}$) фиксируется регистрами Р и отображается индикаторами И. Таким образом, в одном из регистров зафиксировано "верхнее" значение артериального давления $P_a=P_{ав}$, а в другом — "нижнее" значение $P_a=P_{ан}$.

В БПС фактические значения контролируемых параметров сравниваются с их допустимыми значениями, а при выходе хотя бы одного из них за установленные пределы предупредительный сигнализатор срабатывает, генерирует звуковой и/или оптический сигнал, информируя об этом наблюдателя.

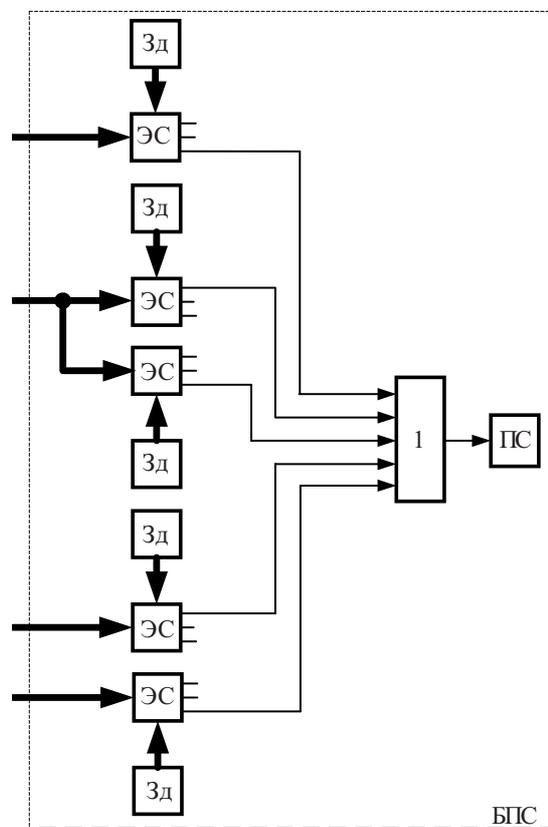


Рис. 5. Блок предупредительной сигнализации: Зд — датчики допустимых значений контролируемых параметров; ЭС — элементы сравнения; 1 — элемент ИЛИ; ПС — предупредительный сигнализатор

Для нужд терапевта или в быту приемлем низковольтный портативный (карманный) тестер [4], внешний вид (лицевая панель) макета которого приведена на рис. 6. В верхней части тестера установлен обратный преобразователь с датчиком импульса сокращений сердца (см. вырез под палец пациента), а на лицевую сторону выведены (по вертикали, слева направо, соответственно): предупредительный сигнализатор, индикатор и кнопка «включено»; датчики (зд) и индикаторы минимально допустимых значений

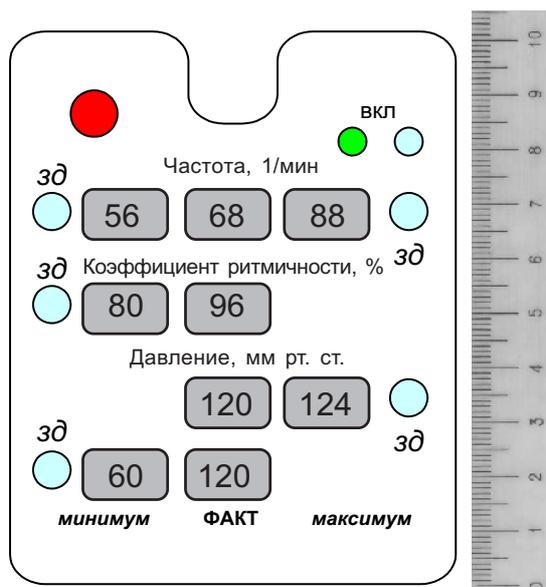


Рис. 6

контролируемых параметров; индикаторы текущих значений контролируемых параметров, индикаторы и задатчики максимально допустимых значений контролируемых параметров. Визуализируемая информация объективно отражает значения артериального давления P_a , частоты сокращений сердца $F_{п}$, коэффициента ритмичности сердечных сокращений α ($\alpha = N_{AB}$) и предупреждает о выходе хотя бы одного из этих параметров за поле их допуска, т. е. при наличии любого из неравенств $P_a = P_{ан} < P_{ан доп}$, $P_a = P_{ав} > P_{ав доп}$, $\alpha > \alpha_{доп}$, $F_{п} < F_{п min доп}$, $F_{п} > F_{п max доп}$.

Тестер может быть использован для самоконтроля и в рабочих условиях. Так, в летательных аппара-

тах обратный преобразователь с датчиком может быть выносным, вмонтированным в штурвал управления, например под левую руку. Выходы регистров блоков БКЧП, БКАС, БКАД и БПС (выход элемента ИЛИ) допустимо соединить с системой технического контроля летательного аппарата или по каналу связи с диспетчером пункта управления полетами [5]. Таким образом, тестер обеспечивает возможность получения предупредительной информации о выходе хотя бы одного контролируемого параметра за поле его допуска в течение длительного времени и позволяет проводить контроль в реальном масштабе времени. Последнее особенно важно в отношении высокодинамичных эргатических систем (например самолетов, вертолетов, автотранспортных средств и др.) с человеком-оператором в контуре управления, т. к. сигнал о выходе любого из контролируемых параметров за допустимые пределы может быть использован в целях предупреждения аварийных ситуаций.

ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ

1. Пат. 33491 України. Пристрій для експрес-контролю аритмії серця людини / М. Д. Скубілін, А. П. Боярінов.— 2001.— Бюл. № 1.
2. Пат. 10396 України. Пристрій для експрес-контролю аритмії серця людини / М. Д. Скубілін, В. В. Стефаненко.— 2005.— Бюл. № 11.
3. Пат. 63568 України. Сфігмоманометр / М. Д. Скубілін, Н. С. Скубіліна, В. В. Стефаненко та ін.— 2004.— Бюл. № 1.
4. Пат. 58325 России. Устройство для экспресс-контроля работы сердца человека / М. Д. Скубилин, И. М. Письменова.— 2006.— Бюл. № 33.
5. Скубилин М. Д., Письменов А. В., Головин С. Г., Бублей С. Е. Система сбора и обработки полетной информации // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2005.— № 2.— С. 6—9.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

10-я Международная специализированная выставка
АВТОМАТИЗАЦИЯ-2007. ЭЛЕКТРОНИКА-2007
 20.03—23.03 2007
 г. Минск, выставочный павильон пр. Победителей, 14



Выставочная компания "Грин Экспо"
 220015, Беларусь, г. Минск, а/я 242, info@greenexpo.by
 телефон/факс: /+ 375-17/ 210-21 34, 251-54 29,
 телефон: /+375-29/ 610-21 34

ТЕМАТИКА

Автоматизация

- Автоматизированные системы и технические средства управления производством и технологическими процессами.
- Промышленные контроллеры.
- Системы контроля, регулирования и управления.
- Промышленная автоматизация. Роботы. Манипуляторы. Периферийное оборудование. Лазерная техника. Обработка изображений в промышленном процессе.
- Обеспечение и контроль качества.
- Информационные технологии и программное обеспечение: системы CAD/CAM, базовые системы и средства разработки программ, инжиниринг, услуги и сервис.

Электроника

Электронные компоненты и комплектующие.

- Полупроводниковые устройства.
- Электромеханические компоненты и технологии соединений.
- Встроенные системы.
- Датчики и микросистемы.
- Источники питания.
- Печатные платы и другие платы для монтажа.
- Пассивные компоненты.
- Оборудование и программное обеспечение - тестирование измерений.
- Узлы и подсистемы.

Технологическое оборудование, материалы и инструменты для производства электронной и электротехнической промышленности.

- Производство полупроводников.
- Микросистемная технология.
- Обработка материалов.
- Производство компонентов, технологии для обработки кабелей.
- Технологии производства печатных плат и других носителей схем.
- Технология монтажа компонентов на поверхность плат.
- Технология пайки.
- Чистовая обработка изделий.
- Испытания и измерения.

А. А. ЗАХАРЧЕНКО, Д. В. НАКОНЕЧНЫЙ, И. Н. ШЛЯХОВ,
к. ф.-м. н. А. В. РЫБКА, к. т. н. В. Е. КУТНИЙ,
д. т. н. М. А. ХАЖМУРАДОВ

Украина, ННЦ "Харьковский Физико-технический институт"
E-mail: rybka@kipt.kharkov.ua

Дата поступления в редакцию
07.09 2006 г.

Оппонент д. т. н. В. К. КОМАРЬ
(Ин-т монокристаллов, г. Харьков)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ CdTe (CdZnTe) ДЕТЕКТОРОВ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

На основе разработанной модели исследованы способы коррекции зависимости чувствительности CdTe (CdZnTe) детекторов от энергии γ -излучения в диапазоне 50...2000 кэВ.

Детекторы γ -излучения на основе полупроводниковых соединений CdTe и CdZnTe отличаются высокой эффективностью регистрации излучения и хорошим соотношением сигнал/шум при комнатной температуре. Большой диапазон измеряемой мощности дозы γ -излучения [1, 2] делает перспективным использование CdTe (CdZnTe) детекторов в системах дозиметрического контроля.

Однако разработка дозиметрических приборов на базе полупроводников с высоким средним атомным номером затруднена из-за сильной зависимости чувствительности детекторов от энергии γ -излучения. Отклик детектора (скорость счета в импульсном режиме и величина собранного заряда в токовом режиме) определяется не только мощностью дозы, но и, в значительной степени, энергией регистрируемых γ -квантов. В результате помимо основной погрешности измерений Δ , связанной со статистическим разбросом параметров источников излучения, неполнотой сбора заряда, собственными шумами детектора и шумами измерительной аппаратуры, возникает дополнительная ошибка Δ_E , величина которой зависит от энергии γ -излучения и может значительно превышать основную погрешность Δ [3].

Для CdTe (CdZnTe) детекторов чувствительность в диапазоне энергии γ -излучения 50...2000 кэВ изменяется в десятки раз, поэтому при использовании таких детекторов в приборах дозиметрического контроля необходима коррекция их энергетической характеристики для уменьшения дополнительной ошибки Δ_E . Такую коррекцию можно выполнить с помощью металлических фильтров либо аппаратно-программным способом [4—7].

Статистический характер процессов взаимодействия γ -излучения с веществом и необходимость учета влияния материалов корпуса прибора и фильтров на чувствительность детектора не позволяют провести расчет параметров коррекции в аналитическом виде.

Цель данной работы состоит в разработке математической модели расчета и коррекции энергетической зависимости чувствительности регистрации CdTe (CdZnTe) детекторов γ -излучения.

Методология и техника эксперимента

Моделирование чувствительности регистрации энергии γ -излучения в диапазоне 50...2000 кэВ проведено для однородных планарных детекторов на основе CdTe и CdZnTe, работающих в импульсном режиме. Результаты моделирования сопоставлялись с экспериментальными данными, полученными на детекторах дозиметрического качества, которые изготовлены в ННЦ "ХФТИ" [1]. Исследованные образцы из CdTe и CdZnTe имели p -тип проводимости. Размеры кристаллов — 5×5×2 мм. На детекторах методом химического осаждения из раствора были нанесены омические контакты из Au.

Облучение детекторов проводили со стороны отрицательного контакта с помощью образцовых спектрометрических источников γ -излучения из набора ОСГИ — ^{57}Co , ^{137}Cs , ^{60}Co , аттестованных по мощности экспозиционной дозы с точностью $\pm 3\%$. Порог дискриминации составлял 60 кэВ. Рабочее напряжение для детектора из CdTe — 130 В, для детектора из CdZnTe — 300 В.

Отклик полупроводникового детектора пропорционален количеству собранных на его электродах неравновесных носителей заряда — электронов (e) и дырок (h), образующихся в результате ионизации вещества детектора под воздействием γ -излучения. Во время перемещения под действием приложенного электрического поля к контактам детектора носители заряда рекомбинируют и захватываются дефектами-ловушками, что приводит к неполному сбору созданного неравновесного заряда. Эффективность сбора заряда определяется как отношение количества носителей заряда, достигших контактов детектора, к полному количеству неравновесных носителей. В случае однородного распределения электрического поля внутри детектора эффективность сбора заряда $\eta(z)$ рассчитывается по уравнению Хехта [8]:

$$\eta(z) = \frac{\mu_e \tau_e V}{d^2} \left(1 - e^{-\frac{(d-z)d}{\mu_e \tau_e V}} \right) + \frac{\mu_h \tau_h V}{d^2} \left(1 - e^{-\frac{zd}{\mu_h \tau_h V}} \right), \quad (1)$$

где z — расстояние от отрицательного контакта до точки образования неравновесного заряда;

$\mu_{e,h}$ — подвижность электронов (дырок);

$\tau_{e,h}$ — время жизни электронов (дырок);

V — напряжение смещения детектора;

d — толщина детектора.

Взаимодействие γ -квантов с CdTe (CdZnTe) рассчитано нами с помощью программы моделирования транспорта фотонов и электронов методом Монте-Карло EGSnrc, представляющей собой дальнейшее развитие кода EGS4 [9]. В процессе моделирования предполагалось, что параллельный пучок моноэнергетических γ -квантов падал на поверхность однородного планарного детектора со стороны отрицательного контакта, перед которым могли размещаться корректирующие фильтры из металла. Гамма-кванты равномерно распределены по всей площади детектора (фильтра).

Программа EGSnrc прослеживает траекторию каждого фотона с заданной энергией E_γ от точки входа в детектор (фильтр) до точки выхода из детектора или поглощения в веществе. Для каждого кванта определены потери энергии, которые пошли на образование электронно-дырочных пар в детекторе. Разработанный нами пользовательский код, встраиваемый в EGSnrc, рассчитывает величину собранного заряда и по уравнению (1) определяет количество собранного заряда. В случае, когда величина собранного заряда превышает заданный порог дискриминации, фиксируется импульс.

Доза излучения D , создаваемая параллельным пучком моноэнергетических γ -квантов за время облучения t , равна [10, с. 15]

$$D = \mu_{en} n E_\gamma t, \quad (2)$$

где μ_{en} — массовый коэффициент передачи энергии (истинный коэффициент поглощения);

n — плотность потока γ -квантов;

E_γ — энергия γ -квантов.

Соответственно, чувствительность детектора δ при облучении его γ -квантами с энергией E_γ рассчитывается как

$$\delta = \frac{N_T}{D}, \quad (3)$$

где N_T — количество импульсов детектора, амплитуда которых превышает заданный порог дискриминации.

Расчет чувствительности детекторов и сравнение с экспериментом

Для моделирования энергетической зависимости чувствительности детекторов необходимо определить параметры переноса заряда — произведение подвижности на время жизни электронов $\mu_e \tau_e$ и дырок $\mu_h \tau_h$. Обычно используемый для этого метод спектрометрии α -частиц оказывается непригодным для CdTe (CdZnTe) детекторов дозиметрического качества. Получаемые фотопики вырождены либо сильно искажены, и рассчитать $\mu_h \tau_h$ по зависимости положения фотопика от напряжения смещения невозможно.

В данной работе $\mu_e \tau_e$ и $\mu_h \tau_h$ определены из моделирования зависимости чувствительности детекторов от напряжения смещения при облучении монохроматическим источником γ -излучения. На рис. 1 представлены расчетные зависимости и экспериментальные данные, полученные при облучении детекторов γ -квантами с энергией 662 кэВ (^{137}Cs). Порог дискриминации соответствует энергии 60 кэВ при максимальном для каждого детектора напряжении смещения.

криминации соответствует энергии 60 кэВ при максимальном для каждого детектора напряжении смещения.

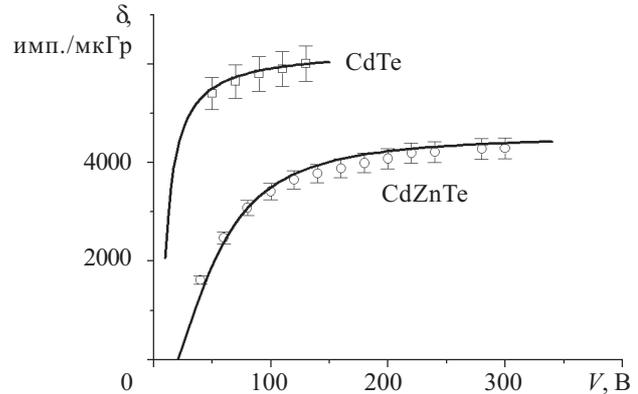


Рис. 1. Зависимость чувствительности детекторов от напряжения смещения

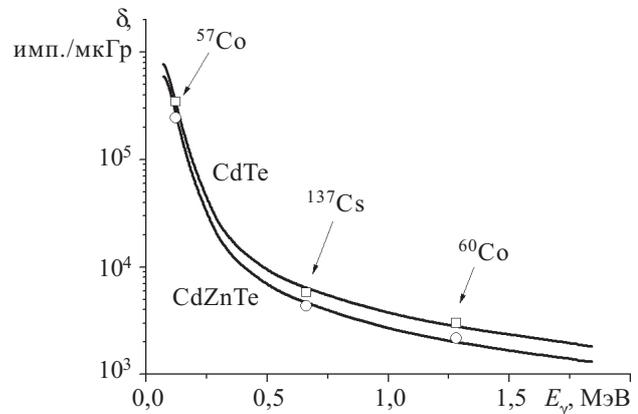


Рис. 2. Зависимость чувствительности детекторов от энергии γ -излучения

Точность расчетных значений $\mu\tau$ проверена сравнением расчетной зависимости чувствительности детекторов от энергии и измеренной экспериментально с помощью источников из набора ОСГИ при максимальном рабочем напряжении детектора (рис. 2). Полученное соответствие расчетных и экспериментальных данных позволяет применить рассматриваемый подход для анализа методов устранения энергетической зависимости чувствительности CdTe (CdZnTe) детекторов.

Коррекция энергетической зависимости чувствительности детекторов при помощи составных фильтров

Использование металлических фильтров для коррекции энергетической характеристики CdTe-детекторов в широком диапазоне энергий впервые экспериментально рассмотрено в [4]. Суть коррекции заключалась в выравнивании отклика детекторов в области энергий γ -квантов 60...1250 кэВ, что достигалось ослаблением потока регистрируемого γ -излучения в области низких энергий с помощью металлического фильтра. Фильтр состоял из перфорированного вольфрама толщиной 1 мм и слоя молибдена (0,1 мм). Вольфрамовый слой поглощает практически все γ -кванты в области энергий ниже 150 кэВ. Пер-

форация обеспечивает пропускание необходимой доли γ -излучения в области низких энергий. Однако, как будет показано ниже, полученные в [4] экспериментальные данные не позволяют определить все особенности применения фильтров для коррекции энергетической характеристики детекторов. Для корректного решения данной задачи требуется большее количество источников γ -излучения, особенно в области энергий ниже 300 кэВ.

На рис. 3 представлена рассчитанная нами чувствительность регистрации γ -излучения для CdTe-детектора относительно энергии 662 кэВ. Конструкция, параметры детектора и составного фильтра соответствуют детекторам, исследовавшимся в [4]: $1,3 \text{ см}^2 \times 0,28 \text{ см}$, $(\mu\tau)_e = 2,45 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{В}$, $(\mu\tau)_h = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{В}$, $V = 500 \dots 600 \text{ В}$, перфорированный W-Mo-фильтр. Прямые линии ограничивают область изменения чувствительности $\pm 60\%$. В области энергий 50...150 кэВ наблюдается резкая зависимость от площади перфорации вольфрама и толщины молибденового слоя, что налагает повышенные требования на точность расчета и изготовления фильтра. Локальный минимум характеристики обусловлен К-краем поглощения вольфрама (69,5 кэВ).

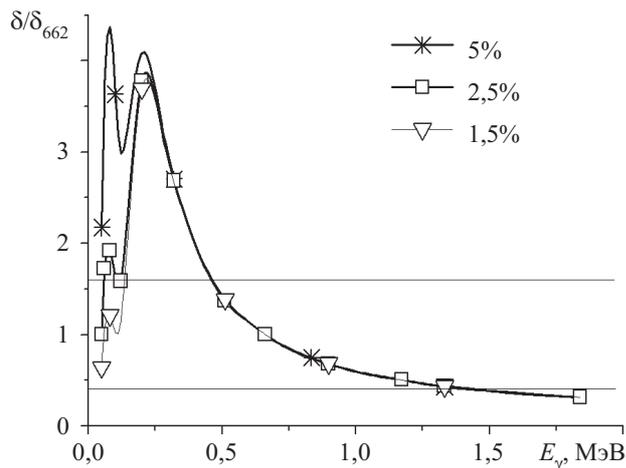


Рис. 3. Чувствительность CdTe-детектора для различных значений степени перфорации (%) вольфрамового фильтра относительно энергии 662 кэВ

В импульсном режиме при заданных параметрах фильтра различие чувствительности для энергий 662 кэВ (δ_{662}) и 1250 кэВ (δ_{1250}) составляет $\approx 60\%$. Однако в области 150...450 кэВ изменение чувствительности относительно энергии 662 кэВ оказывается существенно большим, достигая максимума ($\approx 400\%$) при энергии ≈ 210 кэВ. Для выравнивания чувствительности в области энергий 150...450 кэВ требуется увеличение толщины вольфрама до $\approx 3,5$ мм, что в сочетании с перфорацией резко увеличивает анизотропию детектора для $E_\gamma < 150$ кэВ.

Таким образом, в диапазоне энергии γ -излучения 50...2000 кэВ с помощью составного металлического фильтра невозможно обеспечить выравнивание энергетической зависимости чувствительности при использовании в конструкции дозиметра только одного CdTe (CdZnTe) детектора.

Обработка амплитудного распределения CdTe (CdZnTe) детекторов для измерения дозы

Описанный в литературе метод аппаратно-программной коррекции энергетической зависимости чувствительности CdTe (CdZnTe) детекторов γ -излучения также заключается в выравнивании отклика в требуемой области энергии γ -квантов. Для этого на выходе блока детектирования, работающего в импульсном режиме, корректируется частота импульсов в зависимости от энергии зарегистрированного излучения [4, 7].

Для повышения точности измерений требуется дополнительная обработка сигнала детектора. Одним из вариантов является метод определения поглощенной дозы по измерению средней амплитуды импульсов, возникающих в CdTe (CdZnTe) детекторе при облучении γ -квантами [5]. Для реализации этого метода необходим многоканальный анализатор импульсов, в состав которого входит аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), однокристалльная ЭВМ с устройством отображения информации и спектрометрический тракт для приема сигнала детектора.

Определим среднюю амплитуду импульсов детектора Q_{ph} как отношение всего собранного заряда Q к полному количеству импульсов N_0 , выработанных детектором. Соответственно, энергетический эквивалент средней амплитуды импульсов E_{ph} равен

$$E_{ph} = \frac{W_{det}}{2e} Q_{ph}, \quad (4)$$

где e — заряд электрона;

W_{det} — энергия образования пары "электрон—дырка" в полупроводнике.

Экспериментально установлено [5], что отношение мощности поглощенной дозы к скорости счета детектора линейно зависит от средней амплитуды импульсов E_{ph} в области энергии γ -излучения более 100 кэВ. Средняя амплитуда импульсов определяется из амплитудного спектра, набираемого на протяжении заданного отрезка времени:

$$E_{ph} = \frac{\sum_k kN(k)}{N_T} E_{adc}, \quad (5)$$

где k — номер канала АЦП;

$N(k)$ — количество счетов в канале k ;

E_{adc} — энергетическая ширина канала (цена канала) АЦП.

В разработанной нами модели E_{ph} рассчитывается по формуле

$$E_{ph} = \frac{E_{N_T}}{N_T}, \quad (6)$$

где E_{N_T} — энергетический эквивалент суммы амплитуд импульсов, превышающих заданный порог дискриминации.

Согласно соотношению (3), доза излучения $D = N_T/\delta$. Тогда, в предположении линейной зависимости между дозой и скоростью счета детекторов, получаем уравнение для расчета дозы излучения:

$$D = N_T \frac{1}{\delta} = N_T (ME_{ph} + C), \quad (7)$$

где M и C — константы, определяемые при калибровке детектора.

В эксперименте доза может быть рассчитана из амплитудного спектра с учетом соотношения (5)

$$D = M[E_{adc} \sum_k kN(k)] + N_T C. \quad (8)$$

На рис. 4 приведены экспериментальные данные и результаты моделирования зависимости обратной чувствительности CdTe и CdZnTe детекторов от средней амплитуды импульсов.

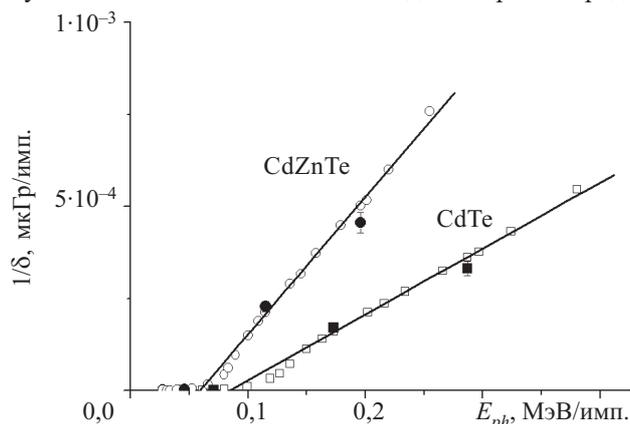


Рис. 4. Зависимость обратной чувствительности от средней амплитуды импульсов детекторов:

□, ○ — расчет по EGSnrc; ■, ● — эксперимент

ней амплитуды импульсов. Экспериментальные значения получены обработкой по формулам (5), (8) спектров детекторов, исследованных при облучении γ -квантами от источников ^{57}Co , ^{137}Cs , ^{60}Co .

Параметры расчета дозы излучения

Детектор	$M, 10^{-3} \text{ мкГр}/(\text{МэВ} \times \text{имп.})$	
	EGSnrc (7)	Эксперимент (8)
CdTe	$1,79 \pm 0,05$	$1,8 \pm 0,1$
CdZnTe	$3,77 \pm 0,09$	$3,9 \pm 0,1$

Линейная зависимость дозы излучения от средней амплитуды импульсов наблюдается в исследованных детекторах в области энергий γ -квантов выше 100 кэВ. Параметры подгонки дозы излучения (7) и сравнение их с приведенными в таблице экспериментальными данными по (8) показывают, что калибровку детектора можно провести с хорошей точностью по трем энергиям (^{57}Co — 122 кэВ, ^{137}Cs — 662 кэВ, ^{60}Co — 1250 кэВ).

Выводы

Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает, что характеристики CdTe (CdZnTe) детекторов дозиметрического качества и приборов, создаваемых на их основе, могут быть определены с хорошей точностью в широком диапазоне энергии γ -излучения на основе рассмотренной модели.

Использование пассивных составных металлических фильтров не обеспечивает приемлемую ошибку измерений дозы излучения CdTe (CdZnTe) детекторами в диапазоне энергии γ -квантов от 60 кэВ до 2 МэВ.

Обоснованы пределы применимости метода измерения дозы γ -излучения, использующего линейность зависимости дозы излучения от средней амплитуды импульсов CdTe (CdZnTe) детекторов. Рассмотренный метод может применяться для измерения дозы в широком диапазоне энергии γ -квантов, начиная с энергии порядка 100 кэВ. Для надежной калибровки таких дозиметров достаточно трех источников γ -излучения (^{57}Co , ^{137}Cs , ^{60}Co).

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

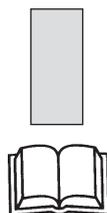
- Rybka A. V., Davydov L. N., Shlyakhov I. N. et al. Gamma-radiation dosimetry with semiconductor CdTe and CdZnTe detectors // Nucl. Instr. & Meth. A.— 2004.— Vol. 531.— P. 147—156.
- Рыбка А. В., Захарченко А. А., Давыдов Л. Н. и др. Сенсоры на основе CdZnTe для измерений рентгеновского излучения // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2006.— № 2.— С. 23—26.
- Франк М., Штольц В. Твердотельная дозиметрия ионизирующего излучения.— М.: Атомиздат, 1973.
- Горев В. С., Кожемякин В. А., Матвеев О. А. и др. Применение детекторов на основе теллурида кадмия в дозиметрии гамма-излучения // ПТЭ.— 1981.— № 1.— С. 60—64.
- Nagarkar V., Squillante M., Entine G. et al. CdTe detector in nuclear radiation dosimetry // Nucl. Instr. & Meth. A.— 1992.— Vol. 322.— P. 623—627.
- Rasolonjatovo D. A. H., Shiomi T., Nakamura T. et al. Development of gamma-ray monitor using CdZnTe semiconductor detector // IEEE Trans. Nucl. Sci.— 2001.— Vol. 48, N 4.— P. 1570—1576.
- Мокрицкий В. А., Маслов О. В., Николаенко Ю. Е., Максимов М. В. Блок детектирования гамма-излучения на основе CdZnTe для систем радиационного контроля // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2005.— № 3.— С. 15—17.
- Hecht K. Zum mechanismus des lichtelektrischen primästromes in isolierenden kristallen // Zeits. Phys.— 1932.— Bd 77.— S. 235—245.
- Kawrakow I. Accurate condensed history Monte Carlo simulation of electron transport. I. EGSnrc, the new EGS4 version // Med. Phys.— 2000.— Vol. 27(4)— P. 485—498.
- Лукьянов В. Б., Бердоносос С. С., Богатырев И. О. и др. Радиоактивные индикаторы в химии.— М.: Высшая школа, 1977.

НОВЫЕ КНИГИ

Шарапов В. М., Мусиенко М. П., Шаранова Е. В. Пьезоэлектрические датчики.— М.: Техносфера, 2006.— 632 с.

В книге приведены конструкции и методы расчета пьезокерамических преобразователей для измерения различных физических величин.

Книга предназначена для научных работников, студентов, специалистов в области разработки приборов, элементов и устройств вычислительной техники и систем управления.



В. В. КУШНИРЕНКО, к. ф.-м. н. Г. К. НИНИДЗЕ,
к. ф.-м. н. С. П. ПАВЛЮК, С. М. САВИЦКИЙ,
д. ф.-м. н. О. В. ТРЕТЯК

Украина, Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко
E-mail: pps@mail.univ.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
26.09 2006 г.

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

ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСОВ ПРЯМОГО ТОКА НА ВРЕМЯ ЖИЗНИ НЕОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В p^+n -ДИОДЕ

Предложен способ регулируемого изменения времени жизни неосновных носителей заряда в базе диодного кристалла полупроводника под действием короткого модифицирующего импульса тока.

Процессы генерации-рекомбинации являются одними из основных в полупроводниковой электронике, поскольку во многих случаях они определяют работу полупроводниковых приборов. Значительную роль в этих процессах играют генерационно-рекомбинационные центры, связанные с собственными дефектами решетки.

В общем случае, согласно теории Шокли-Рида, влияние указанных центров наиболее существенно, когда соответствующие им уровни расположены вблизи середины запрещенной зоны, т. е. при этом обмен носителями между зоной проводимости и валентной зоной через эти центры самый эффективный. Именно наличие глубоких центров того или иного типа придает полупроводниковой структуре желательные или, наоборот, нежелательные свойства. Поэтому с изучением глубоких центров — их физико-химической природы, энергетической структуры, свойств и методов их контролируемого введения — во многом связано решение основной задачи полупроводникового материаловедения: создание полупроводниковых веществ и — на их основе — приборов с заданными характеристиками.

Наиболее информативным параметром генерационно-рекомбинационных процессов является время жизни неосновных носителей заряда. Именно время жизни является наиболее чувствительным к разного рода дефектам, дислокациям, примесям. Известно, что время жизни неосновных носителей определяет коэффициент усиления по току транзисторов, коэффициент полезного действия солнечных батарей, величину обратных токов диодов и транзисторов. В силовых диодах оно определяет максимальную предельную частоту работы прибора f_{\max} , при которой выпрямленный ток не снижается. В импульсных диодах оно определяет время восстановления $\tau_{\text{в}}$ — время, за которое ток через диод после его переключения с прямого направления на обратное выходит на стационарное значение. Существенно, что величины f_{\max} и $\tau_{\text{в}}$ задаются в основном временем жизни неоснов-

ных носителей заряда в базе диода τ_p^* . Для повышения максимальной частоты и уменьшения времени восстановления уменьшают время жизни, для чего разными способами вводят в полупроводник глубокие рекомбинационные центры. Среди этих способов наиболее часто применяются облучение полупроводника быстрыми частицами или γ -квантами [1], легирование его соответствующими примесями [2].

При исследовании сварки-пайки кристалла силового p^+n -диода [3] было обнаружено, что происходит растрескивание кристалла на две части в области металлургической границы. Это происходит потому, что при протекании через кристалл импульса прямого тока с плотностью до 10^4 А/см^2 и удельной мощностью $\approx 10^6 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-3}$ кристалл существенно и неоднородно разогревается. В месте максимального градиента температуры в нем возникают значительные механические напряжения, вследствие которых появляются структурные дефекты.

Было высказано предположение, что после окончания импульса тока эти дефекты из-за быстрого охлаждения кристалла остаются в нем и играют роль дополнительных центров рекомбинации, уменьшая время жизни носителей заряда. А изменение времени жизни должно привести к существенным изменениям характеристик диода.

Целью этой работы и стало исследование изменений времени жизни при протекании тока, изучение влияния таких изменений на характеристики диодов и определение энергетических параметров введенных центров.

В исследованиях использовались кристаллы диодов КД-105—КД-209 с p^+n -переходом, изготовленным методом диффузии. Исходным материалом для кристаллов был кремний марки КЕФ-40 с удельным сопротивлением $40 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. С одной стороны он легировался бором (p -типа), а со второй — фосфором (n -типа). Кристалл имеет форму цилиндра диаметром $1,9 \text{ мм}$ и высотой $0,35 \text{ мм}$. P^+n -переход расположен приблизительно посередине кристалла.

Экспериментальная установка дает возможность исследовать введенные центры рекомбинации (методом термостимулированной проводимости (ТСП) [4, 5]), время жизни неосновных носителей заряда (методом послеинжекционной ЭДС [6, 7]), снимать вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики. Установка позволяет также наблюдать переходные процессы

тока в диоде при переключении его с прямого направления на обратное. В этом случае измеряется время восстановления $\tau_{\text{в}}$ — время, за которое обратный ток уменьшается на 90% от начального значения [8, с. 29—31]. Одновременно можно получить и другую характеристику — максимальную частоту f_{max} , при которой выпрямленный ток не снижается ниже определенного уровня (приблизительно на 30%) [8].

При исследованиях спектра ТСП образец находился на медном блоке держателя, в который вмонтирована спираль для подогрева. Держатель с образцом помещался в криостат с жидким азотом. Включение нагревателя изменяло температуру в криостате. Температура образца измерялась с помощью медь-константановой термопары, второй спай которой погружен в жидкий азот. Сигнал термопары подается на X-вход двухкоординатного автоматического самописца. Заполнение глубоких уровней осуществляется с помощью тока инжекции носителей заряда из p^+ - n -перехода.

Для разогрева диодов использовались специально генерируемые одиночные прямоугольные модифицирующие импульсы прямого тока длительностью 5,4 мс с регулируемой амплитудой. Постоянно происходил контроль времени жизни неосновных носителей заряда.

Вначале, до воздействия разогревающего импульса тока, исследовались те параметры диода, которые обеспечивались экспериментальной установкой. Затем на диодный кристалл подавали модифицирующие одиночные прямоугольные импульсы прямого тока с увеличивающейся амплитудой. Это приводило к возрастанию разогрева кристалла. Наблюдали падение напряжения на кристалле U , изменение эффективного времени жизни неосновных носителей заряда, изменение других параметров диода. Потом проводились исследования образцов методом ТСП для выявления созданных глубоких центров.

Метод послειнжекционной ЭДС диода.

Метод основан на наблюдении изменения падения напряжения на p^+ - n -переходе с течением времени после приложения к нему кратковременного импульса тока в прямом направлении. Если в момент времени t прервать импульс, то прекращение тока через диод сопровождается переходным процессом релаксации напряжения на p^+ - n -переходе.

Известно, что при протекании прямого тока происходит инжекция неосновных носителей заряда, и концентрация дырок в базе диода возле p^+ - n -перехода превышает равновесное значение, чему и отвечает наличие некоторого падения напряжения на p^+ - n -переходе [9]. После мгновенного прекращения тока распределение концентрации дырок в первый момент времени остается неизменным и лишь с течением времени спадает, стремясь к постоянному распределению, которое характеризует состояние термодинамического равновесия.

Таким образом, при размыкании цепи p^+ - n -перехода наблюдается начальное падение напряжения на внутреннем последовательном сопротивлении, потом напряжение на p^+ - n -переходе уменьшается во времени линейно, и в заключительной части происходит его экспо-

ненциальный спад. По линейному спаду этого напряжения можно определить эффективное время жизни:

$$\tau_p = \frac{kT}{q} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta U},$$

где k — постоянная Больцмана;

T — температура;

q — заряд электрона;

Δt — интервал времени существования линейного спада напряжения;

ΔU — величина линейного спада напряжения.

Метод термостимулированной проводимости

Для экспериментального определения основных параметров уровней чаще всего используется метод ТСП, который состоит в следующем.

Если освещать кристалл собственным светом или пропускать ток в прямом направлении при низкой температуре достаточно долго, то установится некоторое стационарное для данных условий неравновесное заполнение уровней прилипания. При достаточно низкой температуре и глубоких уровнях такое заполнение будет сохраняться длительное время после снятия возбуждения. Если предварительно освещенный кристалл медленно нагревать без освещения, то в результате тепловых забросов из уровней в зону концентрации свободных носителей будет возрастать. Это проявится в увеличении тока через кристалл. Величина тока при данной температуре превышает ток этого же кристалла без предыдущего фотовозбуждения. Разница указанных токов представляет собой ТСП. По мере возрастания температуры заполнение уровней прилипания уменьшается, и проводимость должна уменьшаться.

Таким образом, зависимость ТСП от температуры (спектр ТСП) будет немонотонной: при некоторой температуре T_m наблюдается максимум (пик) проводимости. Очевидно, что максимальная проводимость будет наблюдаться при температуре, при которой происходит наиболее интенсивное опустошение глубокого уровня.

Чем более мелкий уровень, тем при более низкой температуре наблюдается максимум ТСП. При наличии в кристалле нескольких уровней, разнесенных энергетически, температурная зависимость ТСП имеет несколько максимумов.

Осциллограммы падения напряжения на образцах показаны на рис. 1. Форма импульса прямого тока прямоугольная.

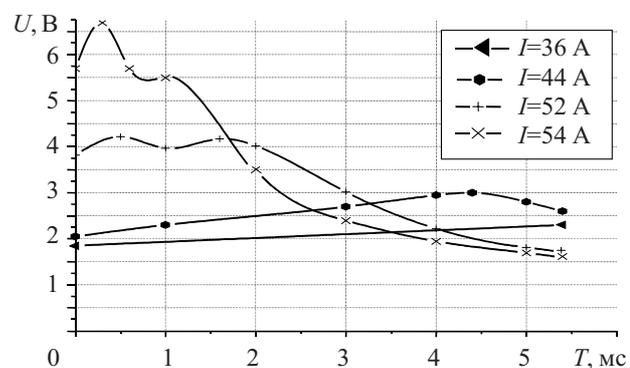


Рис. 1. Осциллограммы напряжения на диоде при разных амплитудах модифицирующего импульса тока

Как видно из осциллограмм, при небольших амплитудах импульсов тока форма падения напряжения повторяет прямоугольную форму импульсов тока ($I < 30$ А). При дальнейшем увеличении тока возникает рост напряжения в виде "горба", после которого оно резко падает ($40 \text{ А} < I < 48$ А). После первого горба появляется второй ($I < 48$ А), затем структура выходит из строя и разрушается.

Появление горбов на осциллограммах сопровождается началом резкого уменьшения времени жизни неосновных носителей заряда в базе диода, что говорит о появлении глубоких центров рекомбинации.

Зависимость времени жизни от амплитуды модифицирующего импульса тока показана на рис. 2. Из анализа полученных результатов следует, что изменение времени жизни τ_p^* при увеличении амплитуды модифицирующего импульса тока происходит в два этапа: начальный момент изменений характеризуется увеличением времени жизни, а при дальнейшем увеличении тока происходит уменьшение времени жизни (кривая 1). Наибольшее уменьшение τ_p^* (в 14 раз) получено в структуре, которая имела наибольшее начальное значение τ_p^* среди всех типов образцов.

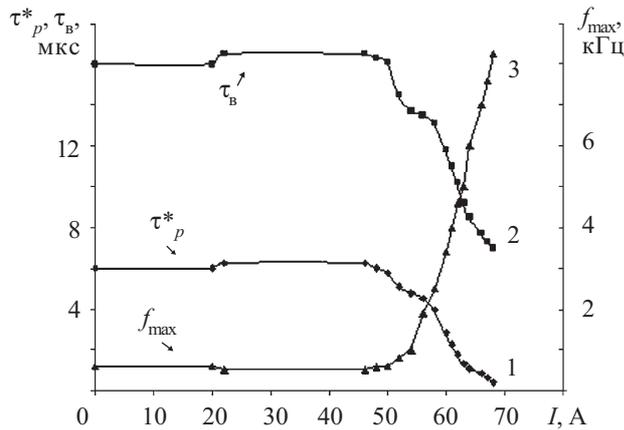


Рис. 2. Зависимость времени жизни (1), времени восстановления (2), максимальной частоты (3) от амплитуды модифицирующего импульса тока I

Кривые 2, 3 на рис. 2 показывают, что при уменьшении τ_p^* происходит изменение переключающих и частотных свойств диода. Из полученных графиков видно, что зависимость τ_v от амплитуды приложенного импульса тока (кривая 2) имеет такой же характер, как и изменение τ_p^* , что хорошо согласуется с теорией, поскольку эти два параметра взаимосвязаны между собой. Однако по сравнению с изменением времени жизни уменьшение τ_v менее существенно и составляет лишь 2—2,25 раза (поскольку при исследовании использовались кристаллы силовых выпрямительных диодов, для которых этот параметр не является характерным).

Оценено изменение максимальной частоты f_{max} . Оказалось, что эта зависимость также повторяет изменение времени жизни (рис. 2, кривая 3). Это закономерно, поскольку для увеличения f_{max} стараются уменьшить τ_p^* , т. к. именно этим параметром определяют частотные свойства диодов. Наибольшее

значение увеличения максимальной частоты составило 14 раз.

В таблице приведены данные об изменениях параметров образцов, подобранных с одинаковым начальным временем жизни. Все параметры до изменения обозначены индексами «0», а после модификации — индексом «М».

Номер образца	Изменение параметров диодов							
	τ_{p0}^* , мкс	τ_{pM}^* , мкс	$U_{п0}$, В	$U_{пM}$, В	f_{max0} , кГц	f_{maxM} , кГц	τ_{v0} , мкс	τ_{vM} , мкс
1	6	0,43	600	300	0,6	8,5	16	7,2
2	6	0,45	650	350	0,6	7,8	16	7,3
3	6	0,42	650	300	0,58	8,4	15,8	7
4	6	0,42	600	300	0,6	8,6	16	7,2
5	6	0,43	600	300	0,6	8,5	16	7,2

Кроме вышеупомянутого влияния модифицирующего импульса тока на время жизни, важным является также воздействие изменения параметров вольт-амперных характеристик (ВАХ) диода, в особенности пробивного напряжения или величины обратного тока.

Изменение величины пробивного напряжения $U_{п}$ при заданном обратном токе для экспериментальных образцов показано в таблице. Как видно, напряжение пробоя уменьшается приблизительно в два раза. Это обстоятельство объясняется тем, что за счет примесей, которые осаждаются вдоль дислокаций, появляются локальные области с увеличенным электрическим полем, и это, в свою очередь, приводит к снижению пробивного напряжения.

Полученный методом термостимулированной проводимости спектр токов показан на рис. 3. До воздействия модифицирующего импульса тока график ТСП не имеет максимума (кривая 1). После действия импульса модификации на графике ТСП появляется максимум, который соответствует появлению нового уровня рекомбинации (кривая 2).

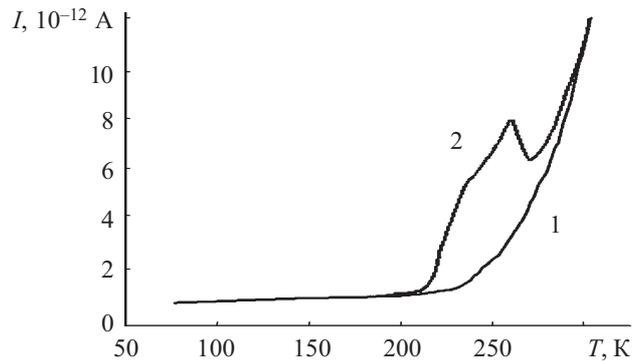


Рис. 3. Спектр токов ТСП:

1 — до модификации; 2 — после модификации

Полученные результаты объяснены следующим образом. Модифицирующий импульс тока приводит к резкому неоднородному разогреву диода. В месте максимального градиента температуры в кремнии, расположенном в зоне границы p^+-n -перехода, возникают наибольшие механические напряжения, которые приводят к образованию в крис-

талле структурных дефектов. После окончания импульса тока, благодаря быстрому охлаждению кремния, эти дефекты “замораживаются” в нем и, судя по всему, играют роль дополнительных центров рекомбинации, уменьшая τ_p^* .

Модификация параметров кремния влияет как на величину τ_p^* , так и на параметры диода. Изменяется также ход ВАХ диода. В приборах с наименьшим начальным эффективным временем жизни ($\tau_p^* \approx 1,5$ мкс) такое влияние меньше, чем в диодах с наибольшим τ_p^* (6 мкс). Предполагается, что это связано с большим количеством исходных центров рекомбинации в кремнии в первом случае, чем во втором, и, как следствие, относительно меньшим влиянием модификации на параметры такого кремния.

Во всех диодах, в первую очередь с наименьшим τ_p^* , возрастание импульсного разогрева сначала сопровождается довольно заметным увеличением τ_p^* , которое можно объяснить возможным отжигом первичных структурных дефектов в кремнии при небольших разогревах и уменьшением количества центров рекомбинации. Дальнейшее увеличение амплитуды импульсов разогрева существенно уменьшает τ_p^* , значительно увеличивает обратный ток диодов, уменьшает в несколько раз напряжение их пробоя (см. табл.).

Изменение τ_p^* , ВАХ, спектра ТСП диодов после модификации параметров кремния свидетельствует о появлении в его запрещенной зоне новых глубоких рекомбинационных центров. Послойное селективное травление поверхности кремния параллельно плоскости p^+-n -перехода обнаружило наличие большого количества линейных дислокаций. Этот результат позволяет считать справедливым наше предположение о связи рекомбинационных центров и структурных дефектов в кремнии после модификации.

В зависимости ТСП, снятой после модификации, появляется пик, который связан с появлением глубокого уровня в образце. Глубина залегания этого уровня была оценена с помощью формулы $E=23kT_m$ [4, 5] и составляет $E=0,56$ эВ. Как видно, величина глубины залегания уровня достаточно большая.

Расчеты в соответствии с [4, 5] позволили оценить также концентрацию введенных центров рекомбинации. Оценки показывают, что эта концентрация колебалась в зависимости от мощности модифицирующего импульса тока в границах 10^{12} — 10^{15} см⁻³.

Выводы

1. Модификация параметров кремния импульсом тока влияет как на величину времени жизни τ_p^* , так и на ход ВАХ диода. В приборах с наименьшим τ_p^* такое влияние меньше, чем в диодах с наибольшим τ_p^* .

2. Начальное увеличение τ_p^* можно объяснить отжигом начальных структурных дефектов в кремнии и уменьшением количества центров рекомбинации. Дальнейшее увеличение амплитуды импульсов тока существенно (до 14 раз) уменьшает τ_p^* , значительно увеличивает обратный ток диодов, уменьшает в несколько раз напряжение их пробоя и даже влияет на его характер.

3. Изменение τ_p^* , ВАХ и спектров тока диодов после модификации параметров кремния свидетельствует о появлении в его запрещенной зоне новых рекомбинационных центров.

4. Послойное селективное травление поверхности кремния, параллельной плоскости p^+-n -перехода, обнаружило наличие большого количества линейных дислокаций. Это подтверждает связь между появлением рекомбинационных центров и структурных дефектов в кремнии после модификации его параметров.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Вавилов В. С. Действие излучений на полупроводники.— Г.: Физматгиз, 1963.
2. Bakanowski A. E., Forster J. H. Electrical properties of goal-doped diffused silicon computer diodes // Bell Syst. Techn. Journ.— 1960.— Vol. 39.— P. 87—94.
3. Павлюк С. П., Кислицын В. М., Мусин А. Г. Влияние формы кремниевого кристалла диода на его разогрев при пайке электро-сопротивлением // Автоматическая сварка.— 1989.— № 5.— С. 72—73.
4. Кульсрешта А. П., Горюнов В. А. О расчете термостимулированных токов // ФТТ.— 1966.— Т. 8, № 6.— С. 1944—1946.
5. Мирджалилова М. А., Парицкий Л. Г. Термостимулированная э.д.с. на электронно-дырочном переходе // ФТТ.— 1966.— Т. 8, № 10.— С. 3090—3092.
6. Викулин И. М., Стафеев В. И. Физика полупроводниковых приборов.— М.: Радио и связь, 1990.
7. Wertheim G. K. Transient recombination of excess carriers in semiconductors // Phys. Rev.— 1958.— Vol. 109.— P. 1086—1091.
8. Полупроводниковые диоды. Параметры, методы измерений / Под ред. Н. Н. Горюнова, Ю. Р. Носова.— М.: Сов. радио, 1968.
9. Зи С. Физика полупроводниковых приборов.— М.: Мир, 1984.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Р. Джексон. Новейшие датчики.— М.: Техносфера, 2007.— 384 с.

Стремительный рост числа разработок и применений датчиков на основе ранее не использовавшихся физических принципов и внедрения новых технологий для реализации известных эффектов стимулирует появление современных руководств.

В учебнике-монографии изложены многие недавно сформировавшиеся или обновившиеся направления сенсорики, включая измерительную микромеханику, датчики на ПАВах, оптические, ионизационные и магнитные, химические микросенсоры, оптиковолоконные и интеллектуальные измерительные системы, расходомерию для нестационарных потоков и ряд других.



К. ф.-м. н. И. А. ОБУХОВ

Россия, г. Москва, «Интерфейс-МФГ»
E-mail: obukhov@interface-mfg.ru

Дата поступления в редакцию
13.02 2006 г.

Оппонент д. ф.-м. н. В. А. ДРОЗДОВ
(ОИСВ, г. Одесса)

ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ПРОВОДОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Дано объяснение наблюдаемого в эксперименте изменения температурной зависимости сопротивления металлических квантовых проводов при изменении их поперечного размера.

В статье [1] представлены результаты измерений температурной зависимости сопротивления квантовых проводов на основе Zn-наноконпозитов. Оказалось, что она качественно различна для «толстых» и «тонких» проводов. Так, при диаметре провода 15 нм наблюдался типичный для металлов практически линейный рост сопротивления с ростом температуры. Однако для проводов диаметром 9 и 4 нм при возрастании температуры наблюдался уже не рост, а уменьшение сопротивления. Эта аномальная температурная зависимость сопротивления более выражена для провода диаметром 4 нм.

Приведенная в статье [1] теоретическая интерпретация результатов измерений не кажется убедительной. Она основывается на формуле, связывающей сопротивление квантового провода с длиной фазовой когерентности (phase-breaking length) электронов проводимости L_ϕ (см. работу [2]). При этом никак не исследуются причины качественного изменения зависимости L_ϕ от температуры при уменьшении диаметра провода, а только производится обратный пересчет L_ϕ , исходя из упомянутой формулы, на основе данных по измерению сопротивления.

В работах [3, 4] показано, что при определенных условиях существенное влияние на электрические характеристики квантовых проводов и приборов на их основе оказывает инжекция электронов из контактных областей в проводящий канал. В частности, учет этого явления позволяет объяснить наблюдаемые высокие значения плотности тока в канале полевого транзистора на основе углеродной нанотрубки [5]. Проведенные расчеты [4, 6] показывают, что собственных электронов в нанотрубке оказывается на порядок меньше, чем инжектированных, и именно последние практически полностью определяют электропроводность прибора.

В настоящей статье исследуется влияние поперечных размеров металлических квантовых проводов на их удельное сопротивление.

Механизмы электронной проводимости в квантовом проводе

Представим квантовый провод (см. рис. 1) состоящим из эмиттерного (ЭК) и коллекторного (КК) контактов и соединяющего их проводящего канала (ПК).

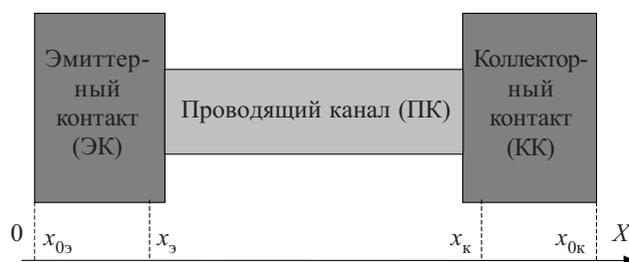


Рис. 1. Квантовый провод, состоящий из эмиттерного и коллекторного контактов и проводящего канала

Для простоты положим, что ПК представляет собой прямоугольный параллелепипед с квадратным сечением плоскостью, перпендикулярной оси OX . Длину стороны этого квадрата (поперечный размер ПК) обозначим через L . Очевидно, что форма поперечного сечения ПК может повлиять на количественные характеристики прибора, но не скажется на его качественных особенностях. Через $x_э$ и $x_к$ обозначим координаты по оси OX «металлургических» границ контактов и проводящего канала.

На рис. 2 показаны первые восемь уровней энергии электронов, возникающих в ПК за счет размерного квантования, для трех значений поперечного размера канала L — 15, 9 и 4 нм. Хорошо видно, что

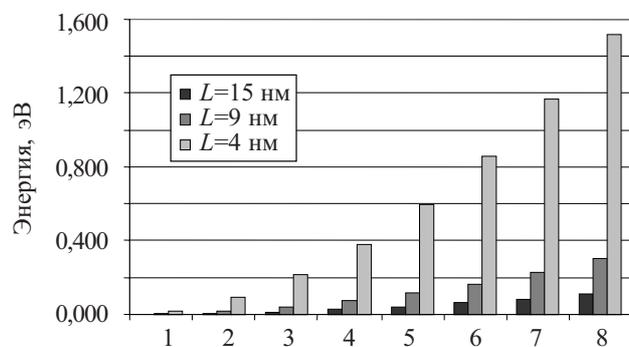


Рис. 2. Первые восемь уровней размерного квантования энергии электронов в ПК для различных поперечных размеров проводящего канала L

плотность состояний электронов быстро уменьшается с уменьшением L .

На рис. 3 показана разница в энергии электронов второго и первого уровней размерного квантования ($E=E_2-E_1$) для тех же значений поперечного размера ПК. При $L=15$ нм E составляет порядка $5 \cdot 10^{-3}$ эВ, плотность электронных состояний в ПК достаточно высока. При $L=9$ нм величина E равна $1,4 \cdot 10^{-2}$ эВ, а энергетический спектр электронов разрежен в полтора раза по отношению к проводу с $L=15$ нм. Для провода с $L=4$ нм $E=7 \cdot 10^{-2}$ эВ, т. е. энергетический спектр электронов разрежен почти в четыре раза по отношению к спектру в ПК с $L=15$ нм.

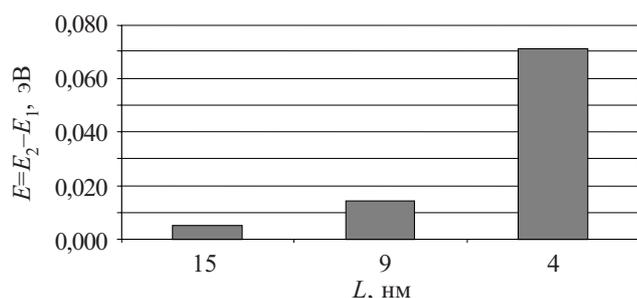


Рис. 3. Разница между энергией электронов на втором и первом уровнях размерного квантования в ПК с различным значением L

Количественные изменения в спектре размерного квантования энергии электронов, регулируемые размером поперечного сечения ПК, приводят к качественным изменениям в эффективном потенциальном рельефе для электронов проводимости в квантовом проводе [4]. На рис. 4 видно, что для провода с $L=15$ нм потенциальный барьер, создаваемый ПК между контактными областями, ниже энергии Ферми (примерно на $2,61 \cdot 10^{-2}$ эВ для рассчитываемой структуры). Назовем такие провода «толстыми». Уменьшение поперечного размера проводящего канала приводит к уменьшению плотности электронных состояний в нем. При достаточно малых L потенциальный барьер, создаваемый ПК, становится выше энергии Ферми. Такие квантовые провода (на рис. 4 с $L=9$ нм и $L=4$ нм) назовем «тонкими».

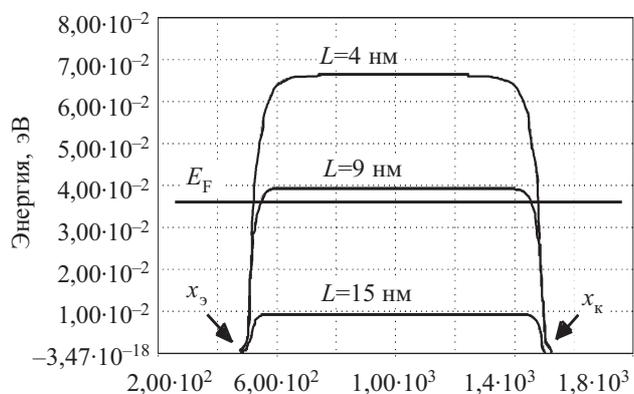


Рис. 4. Энергия Ферми (E_F) и эффективный потенциальный рельеф U^{eff} для электронов проводимости в квантовом проводе в направлении Ox для различных значений L при нулевом смещении

Для электронов в квантовом проводе возможны три механизма переноса заряда [4]:

- дрейфово-диффузионный перенос электронов [7] с энергией, большей высоты потенциального барьера, создаваемого ПК;
- туннельный перенос через потенциальный барьер электронов с энергией, меньшей высоты этого барьера;
- инжекционный перенос электронов с энергией, меньшей высоты этого барьера [3, 4].

Под инжекционным переносом здесь понимается процесс, при котором в контакте, к которому приложено меньшее напряжение, электроны с энергией, меньшей высоты барьера, поглощают энергию тепловых флуктуаций, увеличивая свою энергию до значений, превышающих высоту барьера. Далее они перемещаются в ПК между контактами посредством дрейфа и диффузии, а затем излучают дополнительную энергию в контакте с большим приложенным напряжением. Заметим, что уменьшение энергии инжектированных электронов возможно и в ПК, однако оно ограничено снизу высотой потенциального барьера.

Для описания переноса заряда в квантовом проводе воспользуемся моделью, подробно описанной в [4]. Она позволяет в рамках единого формализма учесть все возможные механизмы проводимости в мезоскопических структурах, к которым относятся квантовые провода.

Разделим допустимые электронные состояния в квантовом проводе на две группы — a - и b -электронов. К a -электронам отнесем те, чья энергия превышает максимальное значение эффективного потенциала U^{eff} , а к b -электронам — те, чья энергия меньше максимального значения U^{eff} .

Такое разделение обусловлено тем, что a -электроны могут свободно распространяться между контактами квантового провода. Плотность их микроскопического потока

$$j = -i\hbar/2m^* \{ \Psi^*(\nabla\Psi) - (\nabla\Psi^*)\Psi \} \quad (1)$$

в состояниях, описываемых волновой функцией Ψ , не равняется нулю. (Здесь и далее i — мнимая единица, \hbar — постоянная Планка, m^* — эффективная масса электронов, ∇ — оператор градиента.)

Следовательно, ненулевой является и плотность макроскопического потока, вычисляемая на основе соотношения

$$N = \sum_E j(E) f(E, F, T), \quad (2)$$

где $f(E, F, T)$ — функция распределения электронов по допустимым состояниям;

E — энергия электронов;

F — химический потенциал электронов;

T — температура окружающей среды.

В используемой модели

$$f(E, F, T) = (1 + \exp\{(E - E_F - F + \tau(v, \nabla F))/kT\})^{-1}, \quad (3)$$

где E_F — энергия Ферми электронов;

τ — время релаксации их импульса;

$v = j/\rho$ — микроскопическая скорость электронов;

$\rho = \Psi^*\Psi$ — микроскопическая плотность числа частиц.

Для b -электронов плотность потока j_b практически равна нулю, поскольку потенциальный барьер, образуемый проводящим каналом между контактами, достаточно широк (как правило, более 100 нм), и коэффициент прохождения b -электронов через него пренебрежимо мал. Соответственно, согласно (2), можно считать близкой к нулю и плотность макроскопического потока b -электронов N_b .

Положим, что a - и b -электроны представляют собой две фазы электронного газа, химические потенциалы F_a и F_b которых могут быть различны. В результате поглощения энергии тепловых флуктуаций происходят переходы электронов из b -состояний в a -состояния и обратные переходы, сопровождающиеся излучением энергии. Эти процессы, лежащие в основе инжекционного механизма переноса заряда в квантовом проводе, можно описать [4] как обмен электронами между a - и b -фазами, используя соответствующие уравнения баланса:

$$\begin{cases} (\nabla, N_a) = -(\gamma/\hbar)(F_a - F_b)(n_a + n_b); \\ (\nabla, N_b) = -(\gamma/\hbar)(F_b - F_a)(n_a + n_b). \end{cases} \quad (4)$$

Правые части уравнений (4) описывают обмен электронов между фазами. Для фигурирующих в (4) макроскопических концентраций электронов в a - и b -фазах справедливы выражения, аналогичные (2):

$$n_{a,b} = \sum_E \rho_{a,b}(E_{a,b}) f_{a,b}(E_{a,b}, F_{a,b}, T). \quad (5)$$

Постоянная γ характеризует скорости переходов между фазами; в расчетах она принималась равной 1/8.

Уравнения (4) решались совместно с уравнениями Шредингера и Пуассона. Из уравнения Шредингера определялись допустимые состояния электронов, их волновые функции и связанные с ними микроскопические плотности и скорости. Уравнение Пуассона использовалось для определения самосогласованного потенциала U^{eff} . В качестве граничных условий для химических потенциалов принимались

$$F_a(x_{0a}) = F_b(x_{0a}) = 0; F_a(x_{0k}) = F_b(x_{0k}) = -eV, \quad (6)$$

где V — приложенное к коллекторному контакту напряжение.

Такая постановка граничных условий позволила описать перенос заряда как в проводящем канале, так и в контактных областях, в которых происходит инжекция электронов. Формулы (2) и (3) дают возможность учесть как квантовые, так и классические явления. В приближении малого времени релаксации τ при условии равновесия a - и b -фаз ($F_a = F_b$) из (3) и (2) получается обычное соотношение для потока дрейфово-диффузионной модели [7].

Зависимость сопротивления квантового провода от температуры

Если энергия Ферми электронов превышает высоту потенциального барьера более чем на среднюю энергию тепловых флуктуаций kT , то количество b -электронов в ПК много меньше, чем количество a -электронов. В этом случае основной вклад в проводимость дают надбарьерные a -электроны, и тип проводимости квантового провода не отличается от типа

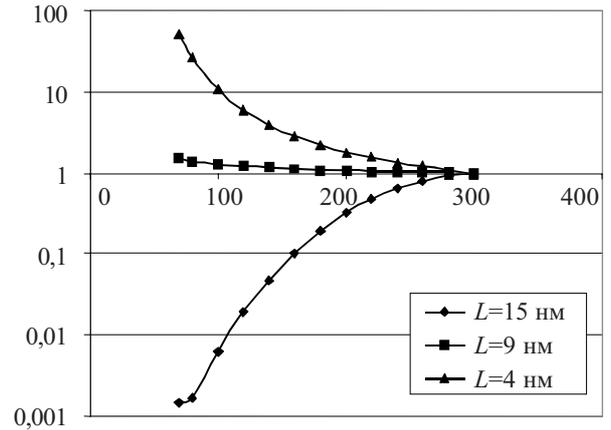


Рис. 5. Зависимость сопротивления квантового провода, нормированного относительно сопротивления при $T=300$ К, от температуры для различных значений L

проводимости контактных областей. Поэтому зависимость сопротивления от температуры для квантового провода с поперечным размером проводящего канала $L=15$ нм имеет обычный для металлов вид (см. рис. 5). Она определяется главным образом температурной зависимостью времени релаксации импульса электронов τ .

Для «тонких» ПК, когда энергия Ферми меньше высоты эффективного потенциального барьера, основным становится инжекционный механизм проводимости. Количество собственных a -электронов в ПК в этом случае мало. Этим обусловлено высокое удельное сопротивление провода при низких температурах. При увеличении температуры, согласно (5), возрастает количество электронов с энергией, большей E_F . Соответственно увеличивается и коэффициент при разности химических потенциалов в правых частях уравнений (4). Как следствие, возрастает число инжектируемых в проводящий канал электронов. На рис. 5 показана рассчитанная температурная зависимость сопротивлений квантовых проводов различного поперечного размера, нормированных относительно их значений при комнатной температуре ($T=300$ К).

Характер температурной зависимости сопротивления квантового провода полностью коррелирует с особенностями его потенциального рельефа, демонстрируемого на рис. 4. Если энергия Ферми превышает высоту потенциального барьера, создаваемого ПК, то сопротивление металлического квантового провода при повышении температуры растет. Если энергия Ферми меньше высоты потенциального барьера, то сопротивление квантового провода при увеличении температуры уменьшается. Эти качественные изменения в электрических характеристиках квантовых проводов регулируются поперечным размером проводящего канала.

При реализации в квантовом проводе инжекционного механизма проводимости количество электронов в ПК начинает существенно зависеть от температуры. Чем выше температура, тем большее количество электронов инжектируется в ПК из контактов, и их концентрация в канале возрастает. Дифференциальное сопротивление ПК пропорционально $(\tau n_a)^{-1}$.

В расчетах предполагалось, что τ обратно пропорционально температуре. Для «тонких» квантовых проводов уменьшение сопротивления с ростом температуры происходит за счет увеличения концентрации электронов в ПК. Этот эффект превышает обратное влияние, обусловленное температурной зависимостью τ .

Заключение

Результаты измерений температурной зависимости сопротивления металлических квантовых проводов, представленные в статье [1], можно объяснить особенностями переноса заряда в квантовых проводах различного поперечного размера.

Сопротивление «толстых» металлических проводов возрастает с температурой так же, как и сопротивление объемного материала. Это связано с тем, что в таких проводах энергия Ферми электронов проводимости превышает высоту расположенного между контактными областями потенциального барьера, создаваемого проводящим каналом прибора. Основным механизмом переноса заряда в этом случае является дрейфово-диффузионный, а основной вклад в проводимость дают надбарьерные электроны.

При уменьшении поперечного размера проводящего канала высота потенциального барьера увеличивается и, наконец, начинает превышать энергию Ферми. Превалирующую роль в переносе заряда в

квантовом проводе начинает играть инжекционный механизм. Количество электронов, инжектированных из контактов в проводящий канал, тем больше, чем выше температура. Именно этим обусловлено уменьшение сопротивления «тонких» металлических квантовых проводов при повышении температуры.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Heremans J. P., Thrush C. M., Morelli D. T., Wu M.-C. Resistance, magnetoresistance and thermopower of zinc nanowire composites // *Phys. Rev. Lett.*— 2003.— Vol. 91.— P. 076804-1—076804-4.
2. Beutler D. E., Giordano N. Localization and electron-electron interaction effects in thin Bi wires and films // *Phys. Rev. B.*— 1988.— Vol. 38, N 8.— P. 8—12.
3. Обухов И. А., Квяткевич И. И., Лавренчук А. А., Румянцев С. В. Статические характеристики пересекающихся квантовых проводов // *Мат-лы 14-й Междунар. Крымской Микроволновой конф.*— Севастополь.— 2004.— С. 507—511.
4. Обухов И. А. Моделирование переноса заряда в мезоскопических структурах.— Москва-Киев-Минск-Севастополь: Вебер, 2005.
5. Martel R., Schmidt T., Shea H. R. et al. Single- and multi-wall carbon nanotube field-effect transistors // *Appl. Phys. Lett.*— 1998.— Vol. 73.— P. 2447—2449.
6. Квяткевич И. И., Обухов И. А., Чекандин М. С. Моделирование полевого транзистора на основе квантового провода // *Мат-лы 12-й Междунар. Крымской Микроволновой конф.*— Севастополь.— 2002.— С. 455—457.
7. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников.— М.: Наука, 1990.

НОВЫЕ КНИГИ

Ю. Альтман. Военные нанотехнологии.— М.: Техносфера, 2006.— 416 с.

В связи с уже полученными революционными результатами в нанотехнологии (НТ), многие страны развернули обширные научно-исследовательские программы в этой области, которые пока носят, в основном, мирный характер. Однако все чаще появляются сообщения о военных программах НИОКР в нанотехнологии (это особенно заметно на примере правительственных программ США). Предлагаемая книга является первым систематическим и сравнительным обзором возможных военных применений НТ.

В течение ближайших двух десятилетий эти технологии могут быть использованы в производстве сверхмалых компьютеров, роботов, ракет, спутников, систем запуска и датчиков. НТ могут привести также к созданию более легких (и одновременно более прочных) материалов, которые найдут применение в производстве боевой техники и оружия, имплантантов (вводимых в организмы солдат), новых типов стрелкового вооружения (без использования металлов), автономных боевых устройств, а также более портативных систем химического и биологического оружия.

В предлагаемом обзоре эти потенциальные возможности применения НТ рассматриваются с точки зрения проблем международной безопасности и новых критериев контроля над вооружениями. Обсуждаются также вопросы международного права и новых угроз устойчивости мирового сообщества, связанных с возможной гонкой вооружений в этой области, появления новых типов оружия, опасности для гражданского населения и общественной жизни. Естественно, что некоторые возможные результаты развития нанотехнологий настолько тесно связаны с мирными применениями, что их невозможно отделить от военных (например, в разработке компьютеров). С другой стороны, некоторые результаты (например, производство биодатчиков для регистрации средств биологической войны) могут оказаться весьма полезными как в борьбе против терроризма, так и при контроле выполнения условий соответствующих международных соглашений по разоружению.

В книге предложены некоторые специфические подходы контроля и превентивного ограничения возможных военных применений новых технологий. Рассматриваются меры по укреплению взаимного доверия, рассчитанные на поддержание мира, а не на усиление национальных военных потенциалов. Книга представляет большой интерес для специалистов в области военных технологий, так называемого несмертельного (нелетального) оружия, разоружения и общих проблем международной безопасности.



Д. т. н. А. А. АЩЕУЛОВ, к. т. н. И. С. РОМАНЮК

Украина, г. Черновцы, Институт термоэлектричества, ОАО "Кварц"
E-mail: AshcheulovAA@rambler.ru

Дата поступления в редакцию
28.09 2006 г.

Оппонент В. Ф. КАТАЕВ (Институт
термоэлектричества, г. Волгодонск)

АНИЗОТРОПНАЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МАТРИЦА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Представлена конструкция устройства, предназначенного для определения распределения плотности лучистых потоков в широких спектральных и динамических диапазонах.

Вопрос определения распределения плотности энергии лучистых потоков в широком спектральном и динамическом диапазонах и сейчас остается актуальным [1]. Существующие анизотропные термоэлектрические линейки и приемники предназначены только для определения координат точечных лучистых потоков [2, 3]. В случаях же, когда тепловое пятно сравнимо по площади с верхней рабочей гранью анизотропного оптикотермоэлемента (АОТ), эти устройства не дают однозначной картины распределения плотности энергии в поперечном сечении падающего луча.

Проведенные ранее исследования [4—6] показали, что плотность лучистого потока в заданной точке поверхности верхней грани АОТ однозначно характеризуется величиной и знаком продольной компоненты возникающей термо-эдс. Это позволило предположить, что такой термоэлемент может стать основой для создания координатно-чувствительных матриц [7], работающих в режимах поверхностного поглощения или оптического отражения.

В настоящем сообщении приводятся описание одной из конструкций такого устройства (рис. 1) и его некоторые характеристики.

Рассматриваемая анизотропная термоэлектрическая матрица (АТМ) состоит из АОТ 4 ($a=c \geq b$), нижняя рабочая грань которого ($a \times c$) находится в тепловом контакте с диэлектрическим корпусом-термостатом 7. АОТ выполнен из термоэлектрически анизотропного монокристалла в виде прямоугольной четырехгранной призмы. Его кристаллографические оси с максимальным и минимальным значениями термо-эдс размещены в плоскости $a \times c$ и ориентированы под углом $\varphi = 45^\circ$ к нижней рабочей грани ($a \times c$). На верхней рабочей грани АОТ ($a \times c$) расположены поглощающий слой 1 с неселективным покрытием и электропроводящий слой 2 из металла, например, серебра, который с помощью микропровода 3 соединен с общим электровыводом 6. Нижняя рабочая грань ($a \times c$) содержит точечные микроконтакты, которые

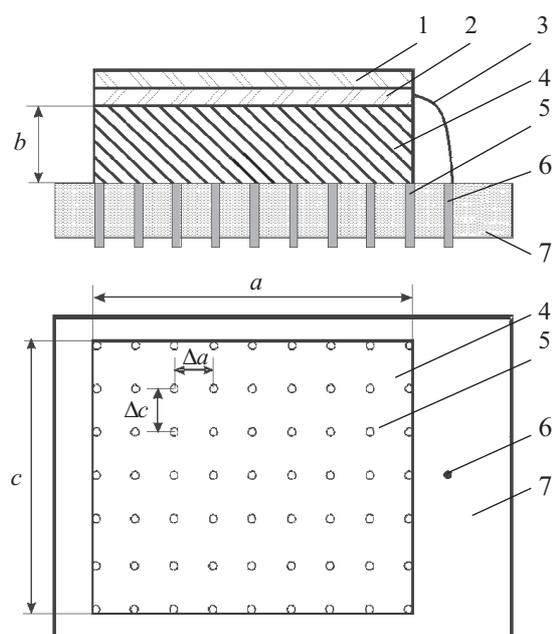


Рис. 1. Конструкция анизотропной термоэлектрической матрицы:

1 — поглощающий слой; 2 — электропроводящий слой; 3 — соединительный провод; 4 — АОТ; 5 — электровыводы микроконтактов; 6 — общий электровывод; 7 — диэлектрический термостатированный корпус

расположены равномерно по всей ее площади и соединены с электровыводами 5, запрессованными в объеме термостатированного корпуса 7 из высоко-теплопроводящего диэлектрика.

Общее количество микроконтактов определяется необходимой величиной разрешающей способности АТМ, т. е. площадью $A = \Delta a \times \Delta c$. Проведенные исследования показали, что, как и для анизотропных термоэлектрических приемников, минимальное значение этой величины определяется радиусом точечного электрического микроконтакта. При этом распределение продольной термо-эдс объема АОТ, вызванное падающим излучением плотностью q_0 , измеряется между общим электровыводом 6 и выводами 5.

Результаты исследований показывают, что в случае излучения с постоянной энергетической плотностью q_0 разность потенциалов $U(x, z)$ между общим электровыводом 6 и контактом с координатами (x, z) остается одинаковой для любых x и z :

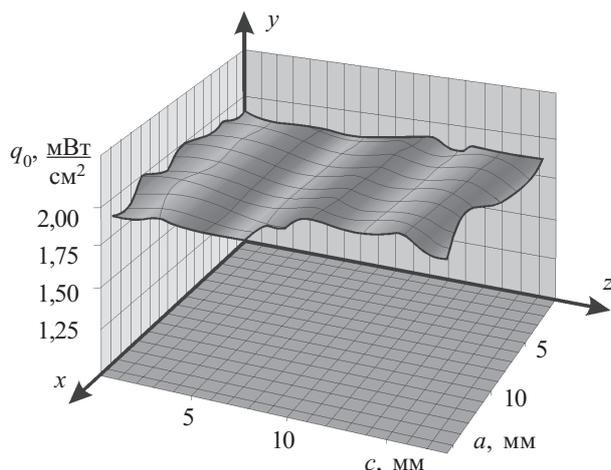


Рис. 2. Распределение плотности теплового потока на верхней грани АТМ
($a=c=18$ мм, $b=1$ мм, $\varphi=45^\circ$, $\Delta x=\Delta z=1$ мм)

$$U(x, z) = q_0 \frac{\alpha_{11}}{\kappa_{11}}, \quad (1)$$

а для излучения с произвольным распределением энергетической плотности

$$U(x, z) = q(x, z) \frac{\alpha_{11}}{\kappa_{11}}, \quad (2)$$

где $q(x, z)$ — плотность падающего лучистого потока в месте расположения контакта с выбранными координатами (x, z) ;
 α_{11}, κ_{11} — коэффициенты продольных термо-эдс и теплопроводности материала АОТ, соответственно.

На рис. 2 представлено типичное распределение плотности лучистого потока на верхней грани АТМ при ее облучении установкой «черного тела» АЧТ-1А, излучающей в спектре длин волн $\Delta\lambda=5...12$ мкм. В таблице представлены характеристики двух экспериментальных АТМ.

Характеристики АТМ с АОТ из CdSb, работающих в режиме поглощения

Тип устройства	Размеры рабочей грани ($a \times c$), мм	Разрешающая способность S , мкВ/мм ²	Максимальная плотность энергии, q_{\max} , Вт/мм ²
АТМ-03	12×12	24,6	$1,5 \cdot 10^{-3}$
АТМ-05	3×3	38,6	$0,9 \cdot 10^3$

Таким образом, показана возможность создания на основе анизотропного оптикотермоэлемента неселективной координатно-чувствительной матрицы, позволяющей определять распределение плотности лучистых потоков в их поперечном сечении в широких спектральных и динамических диапазонах.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. — К.: Техника, 1980.
2. Ащеулов А. А., Гуцул И. В. Анизотропные термоэлектрические координатно-чувствительные линейки // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2006. — № 2.— С. 39–40.
3. Ащеулов А. А., Гуцул И. В., Фотий В. Д. Координатно-чувствительный приемник на основе анизотропного оптикотермоэлемента // Там же. — 2006. — № 4. — С. 42–44.
4. Ащеулов А. А., Гуцул И. В. Исследование анизотропных оптикотермоэлементов в случае различных оптических и тепловых режимов // Там же. — 2005. — № 4. — С. 10–18.
5. Ащеулов А. А. Вольт-ваттная чувствительность радиационных анизотропных оптикотермоэлементов при различных оптических и тепловых режимах // Оптический журнал. — 2006. — Т. 73, № 5. — С. 36–48.
6. А. с. 1141954 СССР. Анизотропный термоэлектрический приемник неселективного излучения / А. А. Ащеулов, В. И. Ильин, В. М. Кондратенко, И. М. Раренко.— 1984.
7. Пат. 4192 України. Анизотропний термоелектричний приймач випромінювання / А. А. Ащеулов.— 2005.— Бюл. № 1.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ



Ученый совет по проблеме “Физика полупроводников” НАН Украины,
Министерство образования и науки Украины, Министерство промышленной политики Украины, Украинское физическое общество, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАН Украины, Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова



ПРОВОДЯТ III Украинскую научную конференцию по физике полупроводников (УНКФП-3)

Украина, Одесса, 17—22 июня 2007 г.

Научные направления конференции

1. Новые физические явления в объемных полупроводниках.
2. Физические явления в низко- и квантоворазмерных структурах.
3. Физика полупроводниковых приборов:
 - Проблемные вопросы микро- и нанозлектроники, квантовые и наноструктурные приборы.
 - Современные физико-технические аспекты оптоэлектронных приборов.
 - Сверхвысокочастотная и терагерцовая электроника.
 - Экстремальная электроника.
4. Материаловедческие и технологические аспекты перспективных полупроводниковых материалов.

Информация о конференции размещена на веб-странице
http://www.isp.kiev.ua/confer/index_ua.htm

Локальный оргкомитет “УНКФП-3”:
Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова
ул. Дворянская, 2, г. Одесса, 65026, Украина,
тел./факс +38(048)-723-34-61,
тел. +38 (048)-726-63-56,
Лепих Ярослав Ильич
E-mail: ndl_lepikh@onu.edu.ua

К. т. н. А. И. ТКАЧУК, к. т. н. О. Н. ЦАРЕНКО,
к. т. н. С. И. РЯБЕЦ, к. ф.-м. н. И. Ю. ТКАЧУК, Ю. Г. КОВАЛЁВ

Украина, Кировоградский гос. педагогический ун-т
им. Владимира Винниченко
E-mail: atkachuk@kspu.kr.ua

Дата поступления в редакцию
19.10 2006 г.

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

ПОЛУЧЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ A^4B^6

Предложена лабораторная технология формирования поверхностно-барьерных диодов на основе эпитаксиальных гетероструктур $Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y/Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$.

При изготовлении инфракрасных детекторов эпитаксиальные гетероструктуры на основе четырехкомпонентных твердых растворов A^4B^6 , полученные методом жидкофазной эпитаксии, остаются одними из самых перспективных и недорогих компонентов диодов Шоттки с полупрозрачными металлическими электродами, в которых излучение падает на переход со стороны барьерного контакта [1].

Цель данной работы — разработка лабораторной технологии формирования поверхностно-барьерных структур на основе эпитаксиальных слоев $Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y$, выращенных на полупроводниковых подложках $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$.

Для получения поверхностно-барьерных структур использовались четырехкомпонентные твердые растворы $Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y$ ($0,09 \leq x \leq 0,18$ (ат. д.) и $0,02 \leq y \leq 0,06$ (ат. д.)), которые были выращены методом жидкофазной эпитаксии в потоке очищенного водорода из ограниченного объема пересыщенного раствора-расплава $(Pb_{1-v}Sn_v)_{1-w}(Te_{1-u}Se_u)_w$ ($0,163 \leq v \leq 0,371$ (ат. д.), $0,011 \leq u \leq 0,046$ (ат. д.), $0,01 \leq w \leq 0,05$ (ат. д.)) с использованием вертикального реактора (рис. 1) [1, 2].

В качестве полупроводниковых подложек использовали монокристаллические пластины $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$, которые были получены путем разрезания выращенных методом Чохральского объемных монокристаллов в направлении (100). Подложки имели форму шайбы диаметром 20—30 мм и толщиной 1—2 мм при плотности поверхностных дислокаций $N_d = (1 \dots 8) \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$ и концентрации дырок $P = (5 \dots 8) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Разориентация подложек составляла не больше $0,4^\circ$ относительно кристаллографической плоскости (100). Температура ликвидуса была 773—873 К при скорости программируемого охлаждения 0,1—0,2 К/мин и диапазоне снижения температуры 5—15 К.

Выращенные эпитаксиальные слои p - $Pb_{0,87}Sn_{0,13}Te_{0,96}Se_{0,04}$ имели толщину 5—7 мкм, плотность поверхностных дислокаций $N_d = (3 \dots 7) \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$, концентрацию носителей заряда $P = (4,6 \dots 4,9) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

и холловскую подвижность $\mu_H = (3,7 \dots 4,1) \cdot 10^3 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ при $\approx 80 \text{ К}$.

Поверхностно-барьерные структуры получали путем термического вакуумного напыления с использованием системы масок из нержавеющей стали [1, 3]. Перед формированием омического контакта эпитаксиальные гетероструктуры p - $Pb_{0,87}Sn_{0,13}Te_{0,96}Se_{0,04}/p^+$ - $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ подвергали со

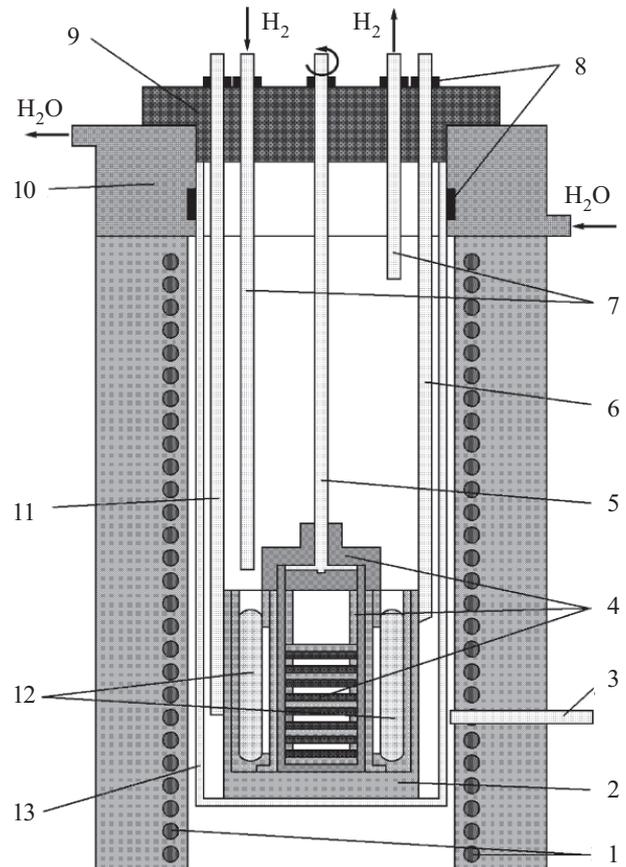


Рис. 1. Схема реактора для жидкофазной эпитаксии: 1 — нагревающий элемент; 2 — графитовый тигель для раствора-расплава; 3 — вход регулирующей термопары; 4 — графитовая поворотная cassette с подложками; 5 — кварцевый шток подвески cassette; 6 — кварцевый шток для передачи вибрации тиглю; 7 — кварцевые трубки газоснабжения; 8 — резиновые уплотнители; 9 — герметизирующая фторопластовая головка реактора; 10 — водоохлаждаемая насадка реактора; 11 — кварцевая трубка для ввода контрольной термопары; 12 — раствор-расплав; 13 — кварцевый реактор

стороны подложки механическому шлифованию с последующим химико-динамическим полированием при комнатной температуре в растворе 95% HBr+5% Br₂ до толщины подложки ≈200 мкм. Затем при температуре подложки T_{под} ≈423...473 К на всю ее поверхность при остаточном давлении 10⁻⁵ мм рт. ст. напыляли последовательно слои золота (толщиной d_{Au} ≈150 нм), хрома (d_{Cr} ≈100 нм) и меди (d_{Cu} ≈250 нм) (рис. 2).

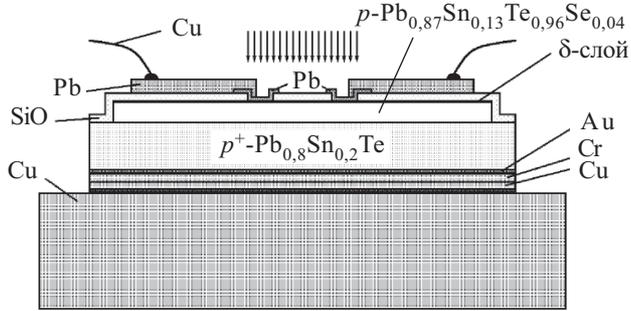


Рис. 2. Схематическое изображение фотоприемника на основе фотовольтаического инфракрасного сенсора Pb/δ-слой/p-Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y/p⁺-Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te/Au/Cr/Cu

Для формирования защитного промежуточного слоя собственного окисла (δ-слоя) толщиной 10 нм свободную поверхность эпитаксиального слоя подвергали термическому окислению при T_{под} ≈473 К в течение 2 мин с последующим (при T_{под} ≈523 К) напылением поверх него изоляционного слоя окисла SiO толщиной 500 нм, в котором оставляли окна 0,5×0,5 мм. В эти окна напыляли полупрозрачные барьерные электроды из свинца толщиной 30 нм при T_{под} ≈300 К. Затем на часть каждого сформированного электрода поверх изоляционного слоя SiO наносились полоски свинца толщиной 1000 нм в качестве контактных площадок. После этого всю структуру крепили со стороны медного слоя к медному теплоотводу с помощью припоя состава 52% In+47% Sn+1% Ag, а также монтировали медные токопроводящие проволочки диаметром 1 мм к контактными площадкам за пределами барьерных электродов.

Измерения темновых вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводили при постоянном токе и температуре ≈170 К. Вольт-фарадные характеристики (ВФХ) исследовали мостовым методом при частоте 1 МГц. Удельную обнаружительную способность поверхностно-барьерных структур измеряли на установке К-54.410 при температуре нагрева абсолютно черного тела 500 К. Модуляция излучения осуществлялась механическим прерывателем с частотой 800 Гц.

Полученные таким образом поверхностно-барьерные диоды Pb/δ-слой/p-Pb_{0,87}Sn_{0,13}Te_{0,96}Se_{0,04}/p⁺-Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te/Au/Cr/Cu имели ВАХ (рис. 3), прямые ветви которых в области напряжений смещения 0,02<U<0,4 В хорошо аппроксимировались зависимостью

$$I = I_s \cdot \exp \left[\frac{q(U - Ir)}{\beta kT} \right], \quad (1)$$

где I_s — ток насыщения, I_s=101...229 мкА;

q — элементарный заряд;

r — последовательное сопротивление, обусловленное суммой сопротивлений квазинейтральной области эпитаксиального слоя, сопротивления растекания подложки и сопротивления омического контакта, r=3,5...6,7 Ом;

β — коэффициент идеальности, β=1,7...2,8;

k — постоянная Больцмана;

T — температура измерений.

Обратные ветви ВАХ насыщения не отражали.

Произведение дифференциального сопротивления при нулевом смещении на активную площадь составляло R_{0A}=0,39...0,92 Ом·см².

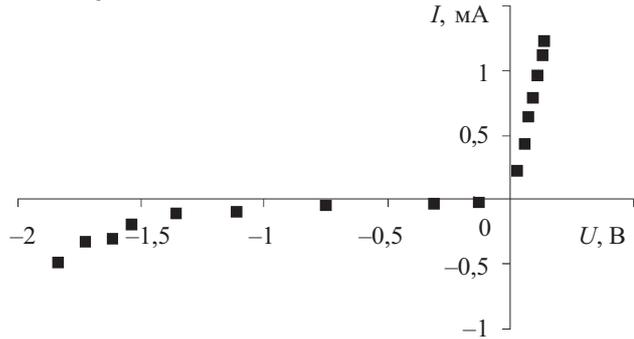


Рис. 3. ВАХ поверхностно-барьерной структуры Pb/δ-слой/p-Pb_{0,87}Sn_{0,13}Te_{0,96}Se_{0,04}/p⁺-Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te/Au/Cr/Cu

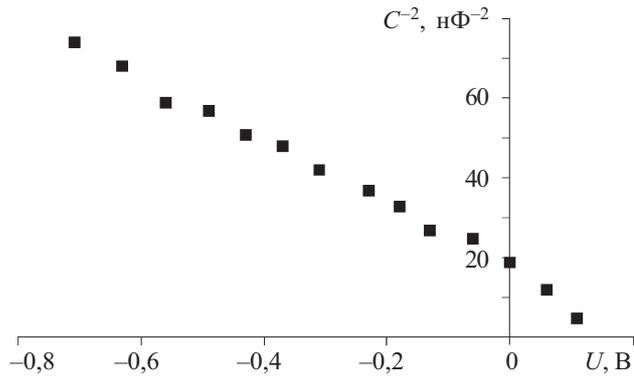


Рис. 4. ВФХ поверхностно-барьерной структуры Pb/δ-слой/p-Pb_{0,87}Sn_{0,13}Te_{0,96}Se_{0,04}/p⁺-Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te/Au/Cr/Cu

ВФХ в области напряжений -0,08<U<0 В (рис. 4) хорошо аппроксимировались зависимостью

$$C^{-2} = \frac{2\beta}{A^2 q N_A \epsilon_0 \epsilon_s} \left[\beta \left(\Phi_{bi}^0 - \frac{kT}{q} \right) - U \right], \quad (2)$$

где A — активная площадь барьерного контакта;

N_A — концентрация заряженных центров;

ε_s — относительная статическая диэлектрическая проницаемость эпитаксиального слоя.

Диффузионный потенциал при нулевом смещении Φ_{bi}⁰=0,106...0,114 В находили по формуле

$$\Phi_{bi}^0 = \frac{U_l}{\beta} + \frac{kT}{q}, \quad (3)$$

где напряжение отсечки U_l определяли путем экстраполяции линейного участка ВФХ до пересечения с осью абсцисс. Емкость при нулевом смещении составляла C₀=221...270 пФ.

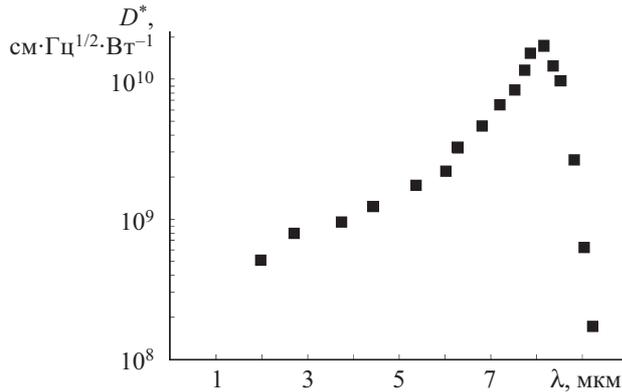


Рис. 5. Спектральная зависимость удельной обнаружительной способности поверхностно-барьерной структуры Pb/δ-слой/p-Pb_{0,87}Sn_{0,13}Te_{0,96}Se_{0,04}/p⁺-Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te/Au

При температуре измерений $T \approx 170$ К, температуре фона $T_{\text{ф}} \approx 300$ К, пиковой длине волны $\lambda_{\text{п}} \approx 8,2$ мкм и длине волны отсечки $\lambda_{\text{от}} \approx 8,5$ мкм удельная обнаружительная способность составляла $D_{\lambda}^* = (0,76 \dots 1,68) \cdot 10^{10}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹ (рис. 5) при пиковой квантовой эффективности $\eta_{\lambda} = 0,33 \dots 0,42$.

Таким образом, проведенные исследования электрофизических и фотоэлектрических свойств полупроводящих поверхностно-барьерных структур Pb/δ-слой/p-Pb_{0,87}Sn_{0,13}Te_{0,96}Se_{0,04}/p⁺-Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te/Au показали, что предложенная технология дает возможность получать фотовольтаические сенсоры, имеющие при пиковой длине волны и температуре 170 К значения удельной обнаружительной способности, близкие к ограниченному фоновыми шумами пределу детектирования.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ткачук А. И. Рідинна епітаксія твердих розчинів сполук A⁴B⁶ для діодів Шоттки / Дис. ... канд. техн. наук.— Херсон, ХДТУ, 2003.
2. Tsarenko O. N., Raybets S. I., Tkachuk A. I. Properties of the Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y epitaxial layers grown from the supersaturated melt-solution on dielectric and semiconductor substrates // Functional Materials.— 2005.— Vol. 12, N 3.— P. 526—530.
3. Царенко О. М., Рябець С. І., Ткачук А. І. Багатоелементні інфрачервоні фотоприймачі на основі епітаксійних гетероструктур p-Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y/p⁺-Pb_{0,80}Sn_{0,20}Te // Вісник НУ "Львівська політехніка". Електроніка.— 2004.— № 513.— С. 89—95.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

МГТУ им. Н. Э. Баумана
и ОАО Центральный научно-исследовательский технологический институт "ТЕХНОМАШ"
организуют и проводят в сентябре 2007 года на базе Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана



XIII Международную научно-техническую конференцию
"ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ"
(МАТЕРИАЛЫ И УСТРОЙСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И МИКРОФОТОНИКИ)

Справки по e-mail:
belyanin@tehnomash.ru
samoylovich@tehnomash.ru
Белянин Алексей Федорович
Самойлович Михаил Исаакович

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Наноматериалы. Нанотехнологии. Наносистемная техника. Мировые достижения за 2005 год. Сборник под редакцией д. т. н., профессора П. П. Мальцева.— М.: Техносфера, 2006.— 120 с.

Приведены мировые новости за 2005 год, сгруппированные по разделам и охватывающие наноматериалы, нанoeлектронику, нанодатчики и наноустройства, диагностику наноструктур и наноматериалов, нанобиотехнологию и применение нанотехнологий в медицине. В книге приведены примеры реализации и применения с цветными иллюстрациями в области технологии формирования наноструктур, методов исследования наноматериалов, метрологическое обеспечение и основы технологии наносистемной техники.

Сборник представляет интерес для ученых, инженеров и преподавателей высшей школы, аспирантов и студентов, специализирующихся в области нанотехнологии, наноматериалов, нанoeлектроники, микро- и наносистемной техники.

Б. М. БЕРЕЗЯНСКИЙ

Украина, НТУУ “Киевский политехнический институт”
E-mail: nekonosan@inbox.ruДата поступления в редакцию
19.10 2006 г.Оппонент д. т. н. Л. А. КАРАЧЕВЦЕВА
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Приведен обзор методов изготовления фотонных кристаллов для нанофотонных микросхем. Рассмотрены перспективы применения технологий в условиях промышленного производства таких устройств.

В последнее время наблюдается стремительное развитие разнообразных устройств радиоэлектроники: мобильные телефоны, компьютеры, в том числе и портативные, приемники, mp3-плееры и многое другое. Важнейший параметр таких устройств — скорость обработки данных, определяемая проектной нормой микросхем. Современная проектная норма, определяющая минимальный размер элемента, равна 65 нм, а в перспективе — 32 нм [1]. С другой стороны, скорость прохождения сигнала ограничивается скоростью распространения электронов. Кроме этого, любое устройство должно не только удовлетворять функциональным требованиям, но и быть компактным, удобным в использовании.

Существенное улучшение функциональных возможностей обеспечивает новое поколение устройств, основанных на распространении световых или акустических волн. Структура этих устройств подобна природной кристаллической, поэтому их можно назвать кристаллоподобными. К структурам такого типа принадлежат фотонные кристаллы (ФК) для световых волн и фононные кристаллы для акустических.

ФК образован периодически чередующимися областями с различающимися оптическими свойствами. Благодаря различию коэффициентов отражения и преломления областей формируется поле определенной направленности и полосы частот, при которых световые волны не могут распространяться в ФК. Такие полосы частот называются фотонными запрещенными зонами (ФЗ). ФК могут быть одно-, двух- и трехмерными.

В настоящее время на основе ФК разработано большое число устройств: микрополосковые линии, фильтры, мультиплексоры, световоды [2]. Это могут быть как отдельные устройства, так и несколько устройств, объединенных в одну нанофотонную интегральную микросхему (НФ ИМС). При проектировании таких устройств интенсивно решаются физические задачи, и лишь небольшое внимание уделяется решению конструкторско-технологических за-

дач. Поэтому на современном этапе, наряду с отдельными ФК, освоено лишь экспериментальное изготовление НФ ИМС и световодов [3, 4].

Поскольку размеры одного элемента НФ ИМС должны соответствовать современным требованиям [1], то при формировании ФЗ необходимо учесть возникновение небольших погрешностей. Они могут привести к значительным изменениям запрещенного для распространения волны диапазона частот, могут повлиять на направление фотонного потока, что делает устройство неработоспособным. Отсюда следуют высокие требования к изготовлению устройств на основе ФК, в частности, необходимость правильного выбора технологии и методики производства. Анализ этих методов и посвящена настоящая работа.

Рис. 1 иллюстрирует последовательность традиционной технологии изготовления ФК [5, 6]. Согласно [5], сначала необходимо подготовить плату для травления. Двойную гетероструктуру $\text{InP}/\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{InP}$ выращивают на InP -подложке, используя рост из газовой фазы на основе металлоорганических соединений. Затем осаждают SiO_2 и покрывают поверхность слоем полиметилметакрилата (ПММА). Поперечное сечение платы после осаждения и нанесения покрытия показано на рис. 1, а.

После этого на пленке ПММА формируется рисунок с использованием электронно-лучевой литографии (рис. 1, б). Затем образец подвергают двум различным процессам сухого травления. Первое травление передает рисунок от ПММА на слой SiO_2 , второе травление передает его полупроводниковым пленкам (рис. 1, в, г). Остатки SiO_2 после травления удаляют жидкостным травлением с использованием плавиковой кислоты (рис. 1, д). Далее образец переворачивают и устанавливают на стеклянную пластину. Материал подложки InP и слой InGaAs удаляют двумя последовательными процессами жидкостного травления, как показано на рис. 1, е–з.

Условно эту технологию можно разделить на три основных этапа: нанесение пленок (эпитаксию), нанесение рисунка (литографию) и травление. На первом этапе определяется состав материалов ФК, на втором — его структура, на третьем удаляют пленки, которые находятся под резистом. Каждый из этих этапов может повлиять на возникновение погрешностей в ФК: 1) слои резиста могут быть нанесены неравномерно; 2) рисунок, полученный вследствие литогра-

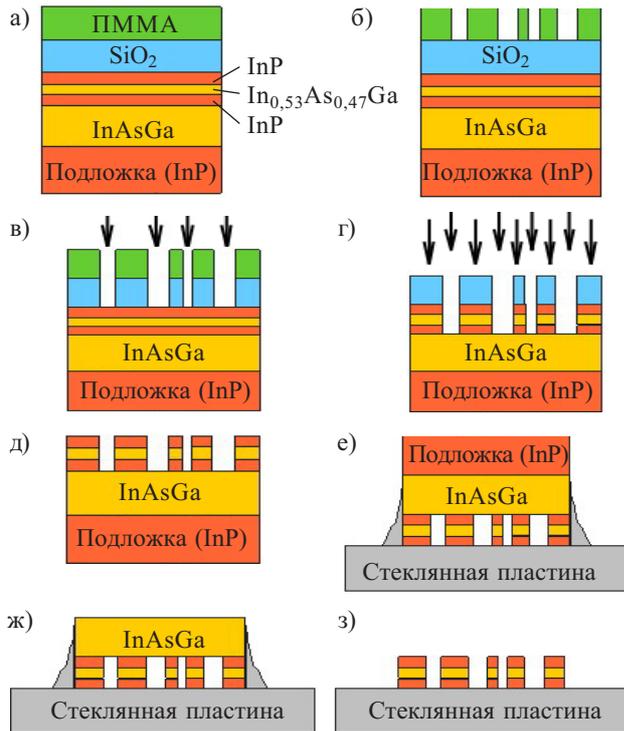


Рис. 1. Процесс изготовления двухмерных ФК на полупроводниковых подложках:

a — размещение слоя SiO₂ и ПММА; *б* — электронно-лучевая литография; *в* — реактивное ионное травление; *г* — химическое травление с помощью ионного луча; *д* — оксидное жидкостное травление; *е* — размещение на стеклянную пластину; *ж* — жидкостное травление; *з* — травление InAsGa

фии, может иметь неровности; 3) после травления остатки материала могут создать структуру, искажающую направление прохождения световой волны. Необходимо учесть разрешающую способность литографии, время производства одного ФК-устройства и возможность изготовления одновременно нескольких устройств.

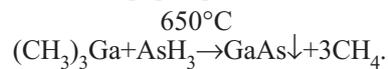
С учетом этих условий необходимо детальное рассмотрение всех методов производства ФК с возможностью выбора наиболее оптимальной их комбинации для того или иного случая.

Основными методами эпитаксии для изготовления ФК являются молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ) и рост из газовой фазы с использованием металлоорганических соединений (РГФ МОС). В первом методе тонкие монокристаллические слои формируют на нагретой монокристаллической подложке за счет реакций между молекулярными или атомными пучками и поверхностью подложки. Пучки генерируются в специальных эффузионных камерах, работающих в области температур до 1400°С. В них происходит испарение требуемых материалов-реагентов. Молекулы и атомы выходят из камер через маленькие отверстия в сверхвысокий вакуум, движутся без столкновений. Высокая температура подложки способствует передвижению молекул или атомов по поверхности. В результате они занимают строго определенные положения, что необходимо для формирования высококачественных периодических структур с запрещенными зонами.

К достоинствам МПЭ следует отнести возможность формирования резких границ между слоями в многослойных структурах — в любой момент можно прервать поступление материала и начать подачу другого. Второе существенное преимущество — возможность контролировать процесс нанесения пленок, анализировать состав и структуру слоев и корректировать ошибки. Существенным недостатком метода является низкая скорость роста, что делает невозможным применение его в крупносерийном и массовом производстве.

Во втором методе, РГФ МОС, первоначально материалы (гидриды, металлоорганические соединения — металл-углеродные или металл-кислород-углеродные) поступают из специальных источников в небольшие смесительные камеры. Поскольку формирующиеся структуры могут быть многослойными и формируются они в едином цикле, то таких источников требуется несколько. Объемы смесительных камер должны быть минимальными, поскольку для формирования резких границ между слоями необходимо быстро менять состав газовой смеси.

Из камеры газовая смесь поступает в реакционную (или проточную) камеру, где под воздействием температуры и водорода, который используется в качестве газа-носителя смеси, происходят реакции разложения (пиролиза) металлоорганики. Образовавшиеся металлы реагируют на нагретой подложке с гидридами, образуя требуемые вещества. Химическая реакция для формирования пленки GaAs имеет вид



Главное достоинство метода — возможность получения структур с большой площадью; это создает условия для массового производства. Метод позволяет также формировать сверхрешетки с толщиной отдельных слоев до 1,5 нм [7].

Недостаток метода — сложность контроля загрязнения материалов пленок углеродом. Кроме того, необходимо принимать меры безопасности при работе с гидридами.

Основные методы литографии приведены на рис. 2. Фотолитография — традиционная технология, применяемая для экспериментального про-

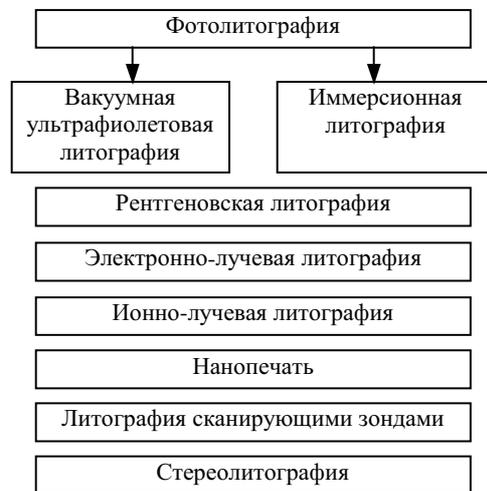


Рис. 2. Методы литографии

изводства ФК [8, 9]. Этот метод состоит в экспонировании тонкого слоя фоторезиста потоком фотонов ближней ультрафиолетовой области. Основным недостатком фотолитографии — дифракционное ограничение размеров проектной нормы размера элемента [10]. Уменьшение проектной нормы обеспечивается уменьшением длины волны экспонирующего излучения. В недавнем прошлом использовалось излучение с длиной волны 248 нм (эта технология получила название литографии на основе глубокого ультрафиолета), в настоящее время — 157 нм [11] (вакуумная ультрафиолетовая литография), при этом проектная норма составляет 65 нм.

Уменьшая длину волны лазера до 157 нм, разработчики столкнулись с тем, что излучение при передаче от источника к фоторезисту поглощается окружающей средой и линзами. Для устранения этой проблемы было решено найти такую среду, в которой луч лазера не поглощается. В результате в зависимости от выбранной среды передачи возникли два новых метода литографии: вакуумная ультрафиолетовая литография и иммерсионная литография.

При разработке метода вакуумной ультрафиолетовой литографии систему линз, которые поглощали излучение, заменили системой зеркал [12]. Отражающее покрытие каждого зеркала состоит из нескольких десятков слоев (40—81 [12]) молибдена/кремния или бора/углерода толщиной в несколько атомов каждый.

Основной принцип работы таков: лазерный луч передается от плазменного источника через зеркало на маску, от которой передает изображение рисунка топологии ФК на систему зеркал проекционной оптики — в ней рисунок многократно уменьшается. Затем изображение достигает тонкой полупроводниковой пленки (рис. 3) [12].

В настоящее время вакуумная ультрафиолетовая литография — наиболее перспективный метод для изготовления ФК наноразмеров, поскольку размер элемента в 65 нм — не предел [1]. Кроме того, она начала применяться в производстве микропроцессоров для персональных компьютеров фирмой Intel, что

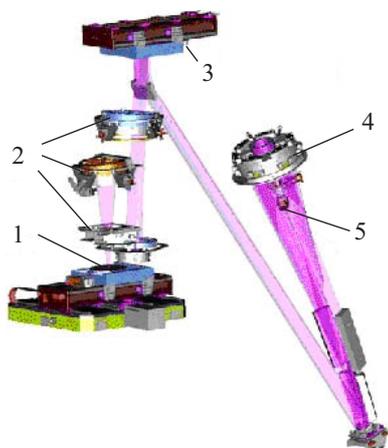


Рис. 3. Схема установки для вакуумной ультрафиолетовой литографии:

1 — полупроводниковая пленка; 2 — зеркала; 3 — шаблон; 4 — конденсор; 5 — плазма

повлечет за собой дальнейшее ее развитие и, как следствие, удешевление установок.

Заметный недостаток этого метода — сложность изготовления самих установок, что связано с тонкостью производства проектирующей системы зеркал. Особые требования предъявляются к маскам — они не должны содержать дефекты. И, наконец, необходимы системы контроля, поддерживающие вакуум достаточно высокой степени.

При разработке иммерсионной литографии было решено отказаться от работы с длиной волны экспонирующего излучения 157 нм и остановиться на длине волны 193 нм — в этом случае не требуется менять систему линз на зеркала, производство которых достаточно сложно. Основной упор разработчики сделали на среду, в которой проходило бы экспонирование, руководствуясь уравнением Рэлея [13], определяющим минимальные размеры элемента, получаемого экспонированием:

$$W = \frac{k_1 \lambda}{NA},$$

где k_1 — фактор разрешающей способности;
 λ — длина волны экспонирующего излучения;
 NA — числовая апертура,
 $NA = n \cdot \sin \alpha$;
 n — показатель преломления среды экспонирования;
 α — угол восприятия линз.

Таким образом, при увеличении значения NA уменьшается минимальный размер экспонируемого элемента. Исходя из этого в качестве среды экспонирования была взята вода, которая при небольших расстояниях от источника излучения до резиста дает незначительное затухание.

Для воды $n=1,329$ (для воздуха $n=1$). При $k_1=0,25$, $\lambda=193$ нм, $\sin \alpha=0,93$ получим минимальный размер элемента:

$$W = \frac{0,25 \cdot 193}{1,329 \cdot 0,93} = 39 \text{ нм.}$$

Схема установки для иммерсионной литографии изображена на рис. 4 [13]. Пластина с резистом, а также система линз, помещаются в специальную емкость, наполненную водой. Перед применением воду очищают от нежелательных пузырьков примесей га-

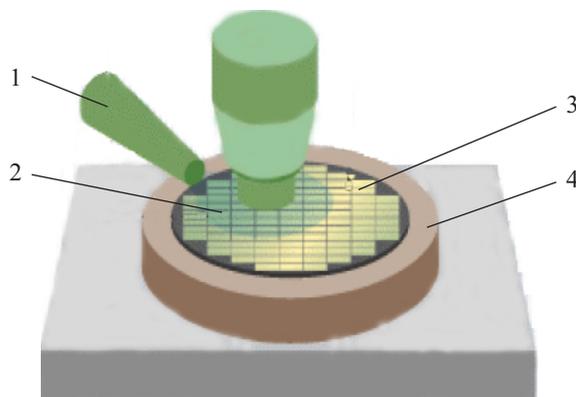


Рис. 4. Схема установки для иммерсионной литографии:

1 — вода; 2 — излучение HeNe-лазера; 3 — подложка; 4 — механизм, вращающий основание с подложкой

зов, наличие которых может привести к искажениям экспонируемого рисунка. Расстояние от системы линз до резиста должно быть до 6 мм, тогда поглощение водой экспонирующего луча будет менее 5%. Иногда в установке используют интерференцию двух лучей, благодаря чему этот метод получил еще одно название — интерференционная литография [14, 15].

Существенный недостаток метода — граничное значение размера элемента (39 нм), которое достигается только при условии применения воды. В случае перехода на технологию с использованием экспонирующего излучения с длиной волны 157 нм вода, равно как и линзы, не годится для передачи излучения к резисту. Для дальнейшего развития этой технологии необходим поиск другого вещества или таких добавок в воду, при которых не происходило бы поглощение лазерного излучения с длиной волны 157 нм. В настоящее время эта технология применяется в экспериментальном производстве ФК [16].

Другим широко распространенным методом в экспериментальном производстве ФК стала электронно-лучевая литография (ЭЛЛ) [5, 6]. Установка для ЭЛЛ содержит вакуумируемую колонну с источником электронов, системой ускоряющих электродов, магнитными линзами, а также систему сканирования электронного луча по поверхности экспонируемой подложки. Системы формирования электронного луча обеспечивают создание потока электронов с энергией 20—100 кэВ, сфокусированного в пятно размером 1—1,5 нм. Луч сканирует по поверхности покрытой резистом подложки. С помощью электростатической системы записи луча, управляемой компьютерным генератором изображения, экспонирование поверхности резиста производится выборочно в соответствии с требуемой геометрией создаваемых элементов. В качестве резиста наиболее часто используют ПММА.

Для пленок металлов используется второй подход, который получил название взрывной литографии (lift-off process) [7]. На этапе подготовки маски пленка резиста экспонируется за один проход электронного луча, после чего проявляется в соответствующих химических реагентах. Затем производят осаждение пленки металла. При этом атомы и молекулы металла должны поступать к поверхности подложки в перпендикулярном направлении — чтобы пленка металла формировалась только на подложке в окнах резистивной маски и на поверхности резиста. Подготовленные таким образом структуры подвергаются химической обработке в активном органическом растворителе. Оставшаяся пленка металла на подложке повторяет рисунок экспонированных областей.

Основным сдерживающим фактором применения ЭЛЛ для изготовления ФК в условиях массового производства остается невысокая скорость обработки подложек большого диаметра. С другой стороны, эта технология уже широко применяется в экспериментальном производстве ФК, что дает возможность достаточно легко внедрить ее в массовое производство.

Развитием ЭЛЛ стала ионно-лучевая литография. Применение этого метода также возможно для экспериментального изготовления ФК в лабораторных

условиях благодаря высокой разрешающей способности — до 10—20 нм [17]. Основным отличием этого метода от ЭЛЛ является применение потока ионов вместо потока электронов. Отсюда исходят и требования к ионной оптике, управлению ионным пучком, что повышает стоимость самих установок. Кроме того, процесс последовательного экспонирования ионным лучом остается слишком медленным, что также затрудняет внедрение ионно-лучевой литографии в массовое производство ФК.

Альтернативный метод изготовления наноструктур — нанопечать [18]. Этот метод использует новые подходы в изготовлении ФК — чернильную печать и тиснение с применением штампов для нанесения рисунка.

Чернильная печать (или, согласно [18], микроконтактная печать) состоит в нанесении чернил на подложку при помощи эластичного штампа. Нанесенные чернила образуют самоупорядоченную мономолекулярную пленку, которая используется в качестве шаблона при дальнейшем травлении. Штамп изготавливают из полидиметилсилоксана, чернила — из тилола или его производных [7].

Метод чернильной печати имеет ряд сложностей. Во-первых, при многократном использовании эластичные штампы могут незначительно изменять свои размеры, то же происходит и при изменении температуры окружающей среды. В связи с этим приходится вместо сплошного эластичного штампа использовать тонкую эластичную пленку, нанесенную на твердый штамп. Во-вторых, при контакте штампа с подложкой происходит диффузионное размытие рисунка, которое достаточно сложно корректируется. В-третьих, поскольку пленка наносится на весь штамп, включая и боковые стенки, то образуется некоторая «шероховатость» на краях уже отпечатанного рисунка, и для достижения точности элементов рисунка необходимо дополнительное травление.

Указанные недостатки позволяют преодолеть еще одна разновидность печати — печать с наноперенесением. Основным отличием ее является нанесение чернил на горизонтальные (приподнятые или опущенные) плоскости рисунка штампа, но не на боковые стенки. В этом случае шероховатость составляет менее 5—20 нм, что вполне допустимо для многих фотонных структур [18].

Иной подход используется в тиснении. Сначала подложку, покрытую резистом, нагревают до температуры размягчения. Затем твердый штамп с необходимым рисунком под давлением делает соответствующее углубление в резистивной пленке. При этом штамп покрывают специальным соединением, чтобы он не прилип к полимеру. Остатки резиста вымывают при химическом травлении или травлении кислородной плазмой. В качестве резистивной пленки используют термопластические полимеры, зачастую ПММА.

Заметно преимущество этой группы методов для изготовления ФК — их удобство в массовом производстве. Однако они требуют применения штампов с высокой разрешающей способностью, которые, в свою очередь, изготавливаются методом ЭЛЛ [18].

Для изготовления ФК часто используется молекулярная технология, основанная на самосборках и применении сканирующих зондов или микроскопов [19]. Сначала кремниевую подложку пассивируют согласно [7, с. 33] водородом в растворе плавиковой кислоты. Затем формируют органосилановую пленку мономолекулярной толщины — таким образом, чтобы один конец молекул закреплялся на подложке, а другой образовывал новую поверхность. Эту пленку обрабатывают методом сканирующих зондов или при помощи атомного силового микроскопа. В дальнейшем на полученный рисунок закрепляют частицы палладия, высушивают, затем закрепляют частицы никеля. Металлизированная пленка служит шаблоном для дальнейшего травления.

Рассмотрим детальнее обработку пленок методом литографии сканирующими зондами. Основные принципы этого метода сходны с ЭЛЛ. В качестве резиста используется ПММА. Рисунок экспонируется потоком низкоэнергетических электронов, идущих из точечного зонда (низкоэнергетические электроны не дают рассеяния на подложке и не генерируют вторичных электронов). Во время прохождения зонда расстояние между ним и подложкой остается постоянным, не изменяется также и поток электронов. Кроме того, зонды используют для механического формирования структур в пленке резиста или для удаления материала царапанием. После экспонирования резиста с применением зонда необходимо последующее проявление и травление.

Поскольку процесс нанесения рисунка с применением одного зонда достаточно медленный, то применяют специальные головки, в которых объединены несколько зондов. Для приемлемой скорости нанесения рисунка количество зондов в одной головке должно составлять 10^4 — 10^6 [7, с. 31], причем необходимо задавать положение каждого из них относительно подложки.

Иногда вместо зондов применяют атомный силовой микроскоп, который позволяет перемещать отдельные атомы, т. е. избежать погрешностей при создании наноструктур, поскольку рисунок ФК формируется на атомарном уровне.

Для трехмерных ФК разработаны следующие три основные методики [20]. Первый подход состоит в послойном производстве, при котором отдельные двумерные ФК получают при помощи обычных технологий литографии и травления, а потом их соединяют таким образом, чтобы получить необходимую трехмерную структуру.

Второй подход предполагает применение метода коллоидальной самосборки, при котором маленькие диэлектрические сферы, расположенные в жидкости, благодаря поверхностным силам присоединяются к плотноупакованному гранецентрированному кристаллу. Эти кристаллы могут быть заполнены веществом с высоким коэффициентом преломления. Вне такого вещества первоначальные сферы растворяются, чтобы сформировать кристаллы, подобные опалам, с полной ФЗЗ.

Третий подход состоит в применении голографической литографии, которая является развитием им-

мерсионной. Благодаря интерференции четырех лазерных лучей на светочувствительном полимере получается необходимый рисунок.

Первый метод невозможно использовать для наноразмерных ФК, поскольку погрешность при объединении нескольких слоев с размерами элементов рисунка составляет приблизительно 100 нм. Второй и третий методы широко применяются при изготовлении трехмерных ФК. Их преимущество состоит в возможности получения конечного результата за небольшой промежуток времени [20, 21].

В качестве альтернативного метода широкое развитие получила стереолитография. Это единственный метод, позволяющий проектировать и изготавливать трехмерные ФК-структуры в едином цикле [22]. Сначала модель проектируют на компьютере. Затем данные о модели передают на лазерную установку, которая будет формировать само устройство. При компьютерном проектировании в модель вводят специальные переборки, которые призваны предотвращать расслаивание модели в сложных участках, стабилизировать выступы, острые края, отделять заготовки от платформы, на которой будет находиться заготовка во время синтеза. Благодаря переборкам можно также синтезировать сложные модели по частям. Алгоритм синтеза модели изображен на рис. 5.

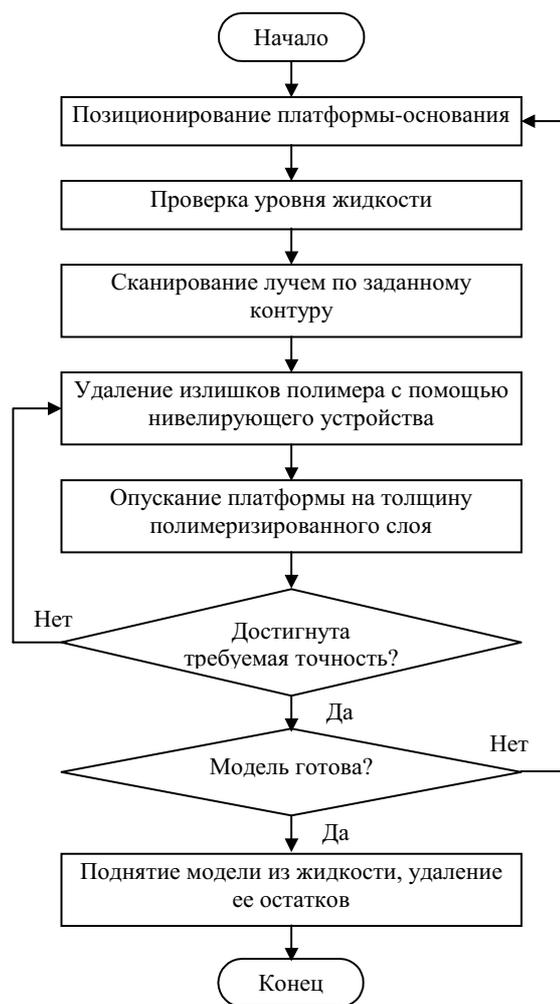


Рис. 5. Алгоритм стереолитографического синтеза модели

Заготовку (фоточувствительный полимер) погружают в специальную ванну с неполимеризованной жидкостью. Ультрафиолетовый лазер вычерчивает первое сечение. В том месте, где лазерный луч поглотился полимером, происходит отверждение (радикальная поляризация) материала. После этого заготовку опускают, рельеф ее поверхности заполняется неполимеризованной жидкостью. Нивелирующее устройство удаляет излишки жидкого полимера, и лазерный луч вычерчивает новый слой. После того, как модель будет полностью сформирована, ее поднимают над уровнем жидкости, излишки жидкости стекают. Затем модель помещается в печь для дополнительного отверждения полимера (температура 100°C). Во время процесса может измениться объем жидкости — из-за усадки полимера, поэтому уровень жидкости корректируется.

Благодаря стереолитографии можно формировать трехмерные ФК, в частности многогранные структуры (рис. 6) [22]. Кроме того, современные установки позволяют готовить исходный материал с помощью стандартных программных пакетов, например AutoCad.

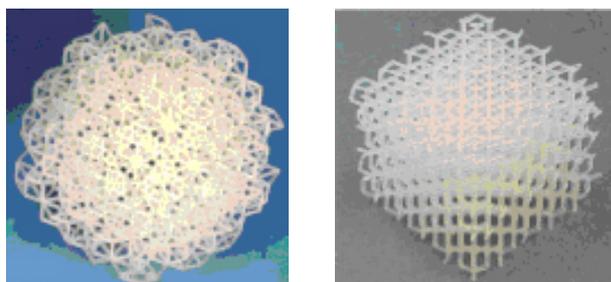


Рис. 6. Примеры трехмерных фотонных кристаллов

К основным недостаткам метода следует отнести высокую токсичность полимера и средств для чистки ванны, длительность постобработки (16 и более часов), высокую стоимость материала, установок и обслуживания установок. К недостаткам можно отнести также необходимость переборок, которые после синтеза модели нужно удалять механическим способом.

Выводы

В настоящее время внедрение фотонных кристаллов нанодиапазона в производство как нанофотонных ИМС, так и отдельных устройств на основе ФК, затруднено высокими требованиями к точности выполнения элементов, поскольку уже незначительные погрешности нарушают условия формирования запрещенных зон. К сдерживающим факторам относятся также сложные условия изготовления и тестирования опытных устройств, высокая стоимость экспериментов и длительность процесса.

Для изготовления двухмерных ФК и устройств на их основе можно применить стандартную технологию, описанную в [5]. При этом для массового производства устройств, в которых нет необходимости соблюдать предельно высокую точность, можно применять в качестве эпитаксии рост из газовой фазы с использованием МОС. Если требуется высокая точ-

ность, то необходимо применять молекулярно-пучковую эпитаксию. В качестве литографии наиболее перспективна вакуумная ультрафиолетовая литография, позволяющая получить проектную норму размера элемента менее 65 нм. Также может использоваться иммерсионная литография — при условии, что удастся подобрать жидкость, в которой интерферирующие лучи не будут рассеиваться. К тому же эти технологии уже освоены в производстве полупроводниковых ИМС. Следует, однако, иметь в виду, что эти технологии не годятся для производства трехмерных ФК-устройств с полной фотонной запрещенной зоной.

Более эффективной — с точки зрения как точности, так и скорости производства, — является молекулярная технология, которая подходит и для трехмерных ФК. Однако метод является громоздким, и пока нет перспектив его внедрения в массовое производство. Альтернативным методом производства трехмерных ФК может стать стереолитография, которая уже успешно применяется в мелкосерийном производстве.

Промышленное освоение ФК-устройств нанодиапазона требует тщательной физико-технической, конструктивно-технологической и организационно-экономической подготовки производства. Кроме того, требуется также значительно большее количество разработанных устройств на основе ФК нанодиапазона.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Thompson G. An Intel perspective on silicon nanoelectronic // Technology and Manufacturing Group, Intel. — 2004.
2. Нелин Е. А. Устройства на основе фотонных кристаллов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2004. — № 3. — С. 18—25.
3. Dumon P., Bogaerts W., Van Campenhout J. et al. Low-loss photonic wires and compact ring resonators in silicon-on-insulator // Proceedings Symposium IEEE/LEOS. — Benelux Chapter. — 2003. — P. 5—8.
4. Желтиков А. М. Дырчатые волноводы // Успехи физических наук. — 2000. — Т. 170, № 11. — С. 1203—1215.
5. Alvarado-Rodriguez I. Fabrication of two-dimensional photonic crystal single-defect cavities and their characterization by elastic scattering // A dissertation ... Doctor of Philosophy in Electrical Engineering. — Los Angeles, University of California. — 2003.
6. Loncar M., Doll T., Vučkovic J., Scherer A. Design and fabrication of silicon photonic crystal optical waveguides // Journal of Lightwave Technology. — 2000. — Vol. 18, N 10. — P. 1402—1411.
7. Нанoeлектроника. В 3 ч. Ч. 2. Нанотехнология // В. Е. Борисенко, А. И. Воробьева. — Мн.: БГУИР, 2003.
8. Carter-Coman C., Brown A. S., Bicknell-Tassius R. et al. Strain-modulated epitaxy: modification of growth kinetics via patterned, compliant substrates // J. Vac. Sci. Technol. — 1996. — Vol. B 14(3). — P. 2170—2174.
9. Smith H. A., Rebert M., Sternberg O. Design infrared filters using stacked metal lattices // Appl. Phys. Lett. — 2003. — Vol 82, N 21. — P. 3605—3607.
10. Рындин Е. А., Коноплев Б. Г. Субмикронные интегральные схемы: элементная база и проектирование. — Таганрог: ТРТУ, 2001.
11. Borodovsky Y., Schenker R., Allen G. et al. Lithography strategy for 65 nm node // <http://apps.intel.com>
12. Extreme ultraviolet lithography. Imaging the Future // EUVL Progress Report S&TR. — 1999. — P. 4—9.
13. Park J. H. The interaction of ultra-pure water and photoresist in 193 nm immersion lithography // 22nd Annual Microelectronic Engineering Conference. — 2004. — P. 34—39.

14. Carter J. M., Fleming R. C., Savas T. A. et al. Interference lithography // MTL Annual Report.— 2003.— P. 186—188.

15. Brueck S. R. J. Optical and interferometric lithography — nanotechnology enables //Proceeding of the IEEE.— 2005.— Vol. 93, N 10.— P. 1704—1721.

16. Divliansky I., Mayer Th. S., Holliday K. S. et al. Fabrication of three-dimensional polymer photonic crystal structures using single diffraction element interference lithography // Appl. Phys. Lett.— 2003.— Vol. 82, N 11.— P. 1667—1669.

17. Вербийский В. Г. Ионные нанотехнологии в электронике.— К.: МП Леся, 2002.

18. Rogers J. A. Photonic applications of printed and molded nanostructures// Dekker Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology.— 2004.— P. 2869—2878.

19. Bryant G. W., Shirley E. L., Goldner L. S. Theory of probing a photonic crystal with transmission near-field optical microscopy // Physical Review B.— 1998.— Vol. 58, N 4.

20. Johnson S. G., Joannopoulos J. D. Introduction to photonic crystals: Bloch's theorem, band diagrams and gaps (but no defects) // MIT.— 2003.

21. Meisel D. C., Wegener M., Busch K. Three-dimensional crystals by holographic lithography using the umbrella configuration: symmetries and complete photonic band gaps // Physical Review.— 2004.— Vol. B 70.— P. 165104-1—165104-10.

22. Weining M., Megens M., Steinhart P. J. et al. Experimental measurement of the photonic properties of icosahedral quasicrystals // Nature.— 2005.— Vol. 436, Issue 7053.— P. 993—996.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ



Министерство образования и науки Украины
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
(Приборостроительный факультет)

Шестая научно-техническая конференция
«ПРИБОРОСТРОЕНИЕ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ»

24—25 апреля 2007 г.

г. Киев, Украина

Тематика конференции

Секция 1. Теория и практика навигационных приборов и систем

Секция 2. Оптические и оптико-электронные приборы и системы

Секция 3. Процессы изготовления приборов, методы и способы их контроля

Секция 4. Теория и проектирование наноприборов и систем измерения механических величин и наноперемещений

Секция 5. Аналитическое и экологическое приборостроение

Секция 6. Биомедицинское приборостроение и технологии

Секция 7. Неразрушающий контроль, техническая и медицинская диагностика

Секция 8. Приборы и системы учета расхода энергоносителей

Секция 9. Информационные технологии в приборостроении, машиностроении и нано-, микропроектировании

Секция 10. Optical instruments and systems

Рабочие языки конференции — украинский, русский

Ученый секретарь Т. Р. Ключко
тел.: (044) 241-86-02
e-mail: klotchko@psf.ntu-kpi.kiev.ua



НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Неволин В. К. Зондовые нанотехнологии в электронике. Издание второе, исправленное и дополненное.— М.: Техносфера, 2006.— 160 с.

Прогресс в микроэлектронике связывают с уменьшением линейных размеров функциональных элементов. Если их размеры становятся порядка нанометров, то существенными являются квантовые эффекты, принципиально меняющие физику работы. Созданием таких элементов и интегральных квантовых схем на их основе занимается нанотехнология.

В монографии изложены физические основы зондовой нанотехнологии на базе сканирующих туннельных и атомно-силовых микроскопов, показаны основные достижения, обсуждаются проблемы, требующие решения.

Предназначена для студентов старших курсов, аспирантов и молодых ученых, желающих познакомиться с новым научным направлением и попробовать свои силы в развитии технологии XXI века.



К. т. н. В. М. БАТУРКИН

Украина, НТУУ "Киевский политехнический институт"
E-mail: baturkin@carrier.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
07.08—14.12 2006 г.

Оппонент к. т. н. А. Л. КОБА
(ОГАХ, г. Одесса)

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЕВРОПЕЙСКОГО СТАНДАРТА PSS-49 ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ ДЛЯ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ МИКРОСПУТНИКА BIRD

Рассмотрены основные аспекты проведения квалификационных испытаний алюминиевых тепловых труб с продольными канавками, предназначенных для использования в системе терморегулирования микроспутника.

Широкое применение тепловых труб (ТТ) в системах терморегулирования (СТР) и теплового контроля космической аппаратуры обусловлено автономностью их функционирования, не требующей затрат энергии и использования механических приводов. Вполне достаточно относительно небольшого перепада температур, чтобы ТТ в условиях пониженной гравитации обеспечили передачу тепловых потоков на уровне 100—400 Вт·м (произведение передаваемого теплового потока и эффективной длины теплопередачи). При этом эффективность теплообменных процессов в ТТ в наиболее востребованном диапазоне рабочих температур (–60...+80°C) находится для зоны нагрева в пределах 2000—15000 Вт/(м²·°C), а для зоны теплоотвода — 5000—20000 Вт/(м²·°C) [1—3].

Особенно часто в СТР космической аппаратуры применяются ТТ на основе алюминиевых сплавов. Кроме минимизации массы, это позволяет для получения продольных канавок различной конфигурации (прямоугольная, трапециевидная, омегаобразная и др.), являющихся капиллярной структурой ТТ, использовать такой высокопроизводительный метод как экструзия. Кроме того, этот метод дает возможность изготавливать ТТ с разнообразной формой сечения, что позволяет конструировать корпус ТТ в соответствии с решаемой задачей. Эти качества ТТ, а также малое термическое сопротивление (менее 0,1 °C/Вт), способствовали широкому применению ТТ как в СТР отдельных приборов, так и для конструирования тепловых сетей значительной протяженности (до 6 м) для обеспечения теплового режима космического аппарата.

В связи с этим чрезвычайно важным становится выполнение программ конструкторско-доводочных испытаний (КДИ), называемых также квалификационными испытаниями.

Для интеграции разработок лаборатории "Тепловые трубы" НТУУ "КПИ" в проекты Европейского космического агентства (ЕКА) обязательным является выполнение требований европейских стандартов,

регламентирующих программы и методики, используемые при разработках ТТ для космического приборостроения. Так, стандарт PSS-49 [4], разработанный в ЕКА, охватывает все аспекты производства ТТ: контроль исходных материалов, изготовление, очистку, заполнение, хранение и т. д., а также оценку наиболее очевидных эксплуатационных характеристик (поле температур, максимальный передаваемый тепловой поток, термическое сопротивление) и проведение комплексных испытаний, включающих механические (вибрация, ударные нагрузки) и климатические (термоциклирование, термоудар, влияние температуры хранения).

Принципиальное отличие между требованиями [4] и ранее использованными квалификационными программами, например для проектов "Венера—Галлей", "Фобос" и др., заключается в применении более универсального подхода. Стандарт [4] рассматривает как объект испытаний ТТ различных конструкций — обычные, газорегулируемые и термодиоды. В нем определены особенности применения различных теплоносителей — таких как азот, метан, этан, аммиак, метанол, вода. Предлагаемый стандартом PSS-49 объем испытаний позволяет использовать ТТ в любых космических миссиях.

Опыт применения данного стандарта в странах СНГ весьма ограничен. Впервые в Украине он был применен в лаборатории «Тепловые трубы» (в 1997—1998 гг.) для квалификации ТТ с продольными канавками, которые были разработаны для системы терморегулирования немецкого технологического микроспутника BIRD [5]. Знакомство с наработками, полученными в упомянутом проекте, на наш взгляд, будет полезным широкому кругу разработчиков космического оборудования.

Разработка ТТ для СТР производится в последовательности, представленной на рис. 1. Приведенный алгоритм был типичным при разработке систем терморегулирования на основе ТТ для 12 научных космических миссий в рамках научной кооперации с Институтом космических исследований РАН (г. Москва, Россия) и СКБ космического приборостроения (г. Бишкек, Киргизия).

Основой для разработки является техническое задание, в котором определены условия эксплуатации, а также предложены соответствующие квалификационные программы и методики испытаний.

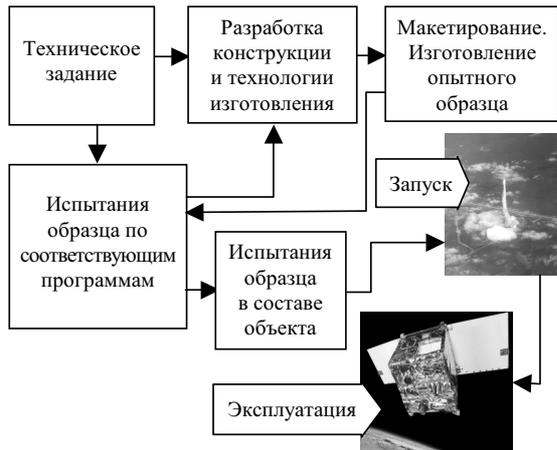


Рис. 1. Последовательность реализации разработки ТТ и СТР

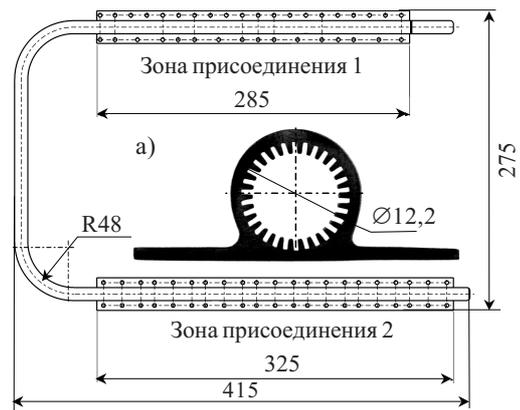


Рис. 2. Внешний вид и поперечное сечение (а) аммиачной тепловой трубы с продольными канавками

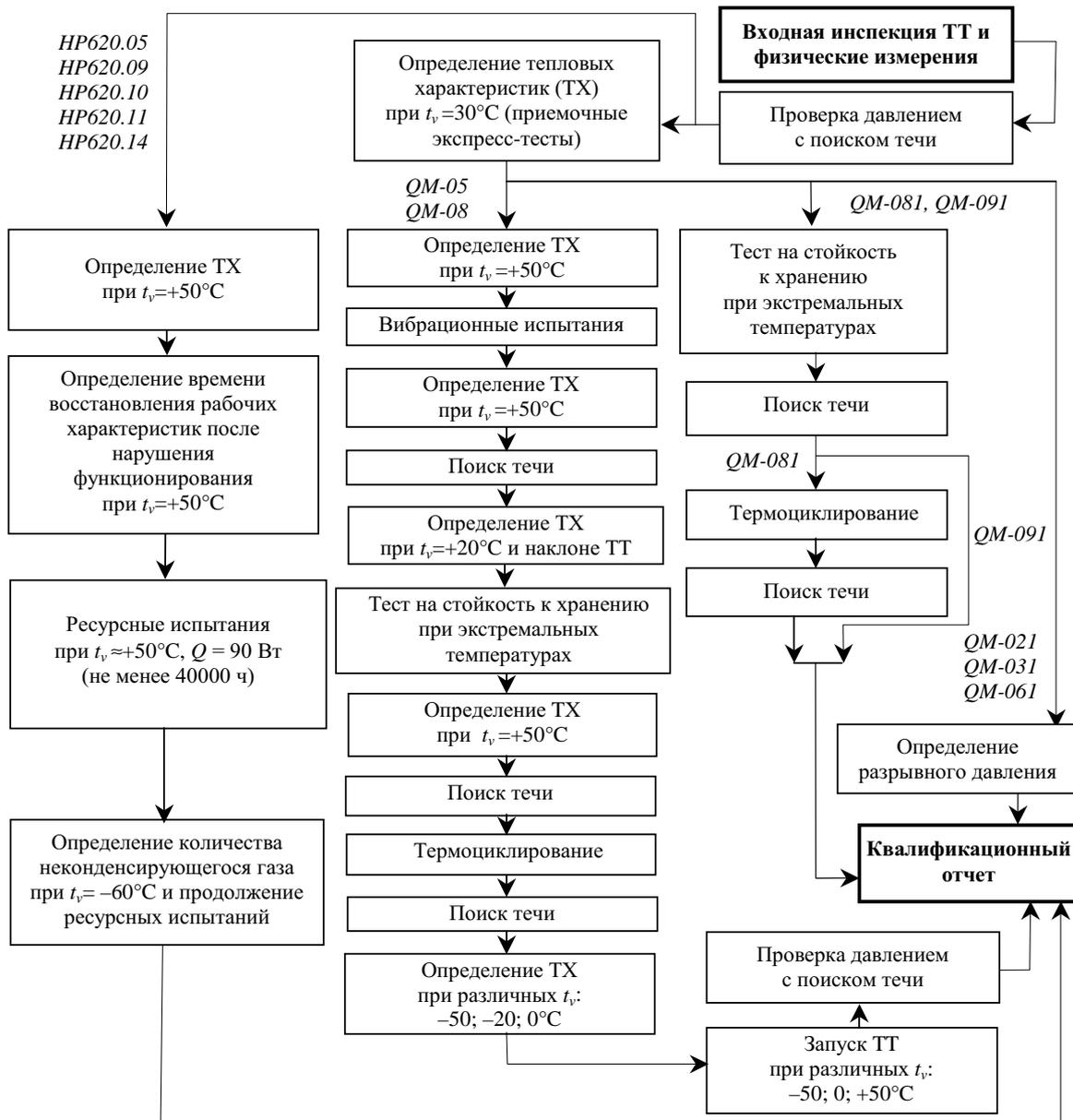


Рис. 3. Последовательность проведения квалификационных испытаний тепловых труб серий HP620 и QM

Объектом квалификационных испытаний являлись аммиачные тепловые трубы U-образной конфигурации (рис. 2), имеющие следующие основные параметры.

Диаметр оболочки, мм	12,2
Толщина стенки оболочки, мм	1
Длина зоны присоединения 1 к прибору, мм	285
Длина транспортной зоны, мм	344
Длина зоны присоединения 2 к радиатору, мм	325
Эффективная длина, мм	650
Материал оболочки	АД-31
Защита оболочки	полирование
Капиллярная структура	прямоугольные канавки
— глубина канавки, мм	1
— ширина в открытой части, мм	0,5
— ширина в закрытой части, мм	0,45
— количество канавок	30
Температура эксплуатации, °С	-40...+40
Термическое сопротивление, °С/Вт	менее 0,07
Тепловая нагрузка в составе СТР, Вт	не более 60
Масса, кг	менее 0,23

Основными тестами в соответствии с [4] являлись: контроль внешних дефектов, контроль размеров корпуса и капиллярной структуры; проверка герметичности и сохранения геометрии ТТ при повышенном внутреннем давлении с последующим контролем на наличие течей теплоносителя; исследование рабочих теплотехнических характеристик; определение давления разрыва оболочки; вибрационные испытания; тесты на хранение; термоциклирование; ресурсные испытания.

Исследования рабочих (теплотехнических) характеристик включали:

— определение термического сопротивления тепловых труб и максимального передаваемого теплового потока при различных значениях температуры испарения (t_v);

— исследование влияния угла наклона ТТ на величину максимального передаваемого теплового потока;

— определение поля температуры по длине ТТ в каждом из испытаний;

— определение времени восстановления работоспособности ТТ после осушения зоны подвода тепла;

— подтверждение способности запуска ТТ при различных значениях мощности теплового потока.

Климатические испытания включали тест на воздействие термоциклирования (300 циклов), предусматривающий резкое изменение температуры тепловой трубы, а также тест на стойкость к хранению при экстремальных температурах.

Пять образцов ТТ были подвергнуты ресурсным испытаниям с целью определения их работоспособности при максимальной рабочей температуре.

На рис. 3 представлена последовательность квалификационных испытаний ТТ серий НР620 и QM, различия в конструкциях которых заключаются только в расположении отверстий для крепежных винтов.

Приемочные испытания, которые проводились для образцов серии FM (летные образцы) и SFM (запас-

ные летные образцы), выполнялись по соответствующей программе, в основе которой лежит сокращенная программа квалификационных испытаний, а также дополнительные испытания ТТ в составе объекта [6—9].

Наиболее трудоемкой задачей является разработка и создание испытательного оборудования. Рассмотрим принципы конструирования некоторых наиболее важных стендов.

Для исследования теплотехнических характеристик ТТ в диапазоне температур $-50...+50^{\circ}\text{C}$ с возможностью отвода до 200 Вт тепловой энергии и соблюдением теплового баланса на уровне $\pm 5\%$ были разработаны два стенда.

Первый стенд применялся для испытаний при температурах $0...+50^{\circ}\text{C}$ (рис. 4). Подвод тепла к ТТ осуществлялся омическим нагревателем, а охлаждение зоны конденсации ТТ — циркулирующей по замкнутому контуру жидкостью (вода или водно-спиртовой раствор). Температура жидкости поддерживалась на заданном уровне жидкостным термостатом. ТТ размещалась в воздушной среде и покрывалась влаго непроницаемой теплоизоляцией. Испытания проводились при условии постоянства температуры пара. Поддержание t_v на заданном уровне ($0, +20, +30, +50^{\circ}\text{C}$) при увеличении теплового потока Q осуществлялось за счет уменьшения температуры охлаждающей жидкости $t_{\text{охл}}$ в соответствии с соотношениями

$$t_v = t_{\text{охл}} + (R_{\text{охл}} + R_{\text{кон}})Q = \text{const}; \quad (1)$$

$$t_{\text{охл}1} - t_{\text{охл}2} \approx (R_{\text{охл}} + R_{\text{кон}})(Q_2 - Q_1), \quad (2)$$

где $R_{\text{охл}}$, $R_{\text{кон}}$ — значения термического сопротивления теплопередачи от корпуса ТТ соответственно к охлаждающей жидкости и к пару в зоне конденсации. Индексы 1 и 2 соответствуют двум значениям передаваемой мощности, причем $Q_2 > Q_1$.

Второй стенд предназначен для испытаний ТТ при температурах $-65...-10^{\circ}\text{C}$. ТТ устанавливалась в вакуумной камере, ее охлаждение осуществлялось жидким азотом через металлическое ребро, соединяющее фланец конденсатора ТТ и сосуд с жидким азотом. Для исследований были выбраны значения t_v , равные -50 и -20°C . Для регулировки уровня температуры пара использовался вспомогательный нагреватель с тепловой мощностью $Q_{\text{нагр}}$, установленный

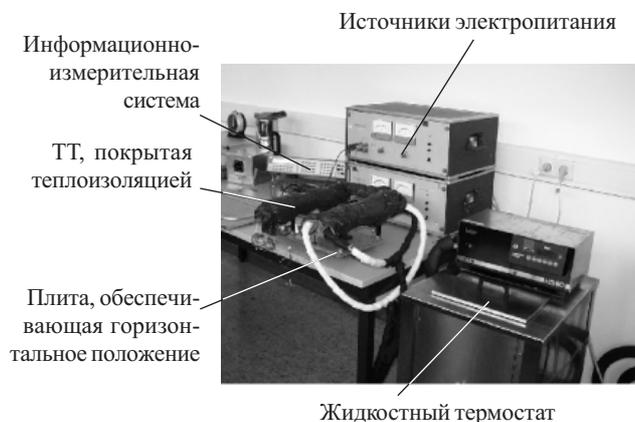


Рис. 4. Стенд для исследования теплотехнических характеристик тепловых труб

по длине соединительного ребра. Для реализации условия

$$t_v = t_{\text{охл}} + (R_{\text{охл I}} + R_{\text{охл II}} + R_{\text{кон}})Q + R_{\text{охл I}}Q_{\text{нагр}} = \text{const} \quad (3)$$

величина $Q_{\text{нагр}}$ должна изменяться по следующему закону:

$$(Q_{\text{нагр I}} - Q_{\text{нагр II}}) / (Q_2 - Q_1) = (R_{\text{охл I}} + R_{\text{охл II}} + R_{\text{кон}}) / R_{\text{охл I}}, \quad (4)$$

где $R_{\text{охл I}}$ и $R_{\text{охл II}}$ — значения термического сопротивления теплопередачи соответственно от вспомогательного нагревателя к охлаждающей жидкости и от корпуса ТТ к вспомогательному нагревателю.

Стенд для испытаний на воздействие термоциклирования включал две ванны с перемешиваемой жидкостью. Температура жидкости в каждой из ванн поддерживалась постоянной и составляла соответственно -60 и $+80^\circ\text{C}$. Тепловая труба поочередно погружалась в каждую из ванн. Время пребывания ТТ в ванне ($\tau = 5$ мин) и время ее перемещения ($\tau_{\text{п}} = 2$ мин) контролировались реле, а температурные датчики фиксировали температуру исследуемого объекта. Из-за значительного количества циклов (более 300) это испытание считают одним из самых критичных для исследуемых ТТ и трудоемких для персонала.

Стенд для испытаний ТТ на стойкость к хранению предусматривал наличие двух ванн, температура жидкости в которых поддерживалась соответственно на уровнях -196 и $+100^\circ\text{C}$. Погружение ТТ в каждую ванну осуществлялось попеременно на 2 ч. Проводилось 5 циклов, в каждом из которых измерялось поле температуры ТТ.

Определение разрывного давления выполнялось по «горячему методу», когда внутреннее давление создается парами теплоносителя, находящегося в ТТ. Средняя температура оболочки ТТ определялась при ее нагреве вплоть до разрыва. Факт разрыва фиксировался акустическим методом. Конструкция стенда гарантировала безопасность персонала при разрыве оболочки и вытекании аммиака из ТТ.

Все виды механических тестов были сведены к испытаниям на воздействие синусоидальных и случайных вибраций. Используемое оборудование позволяло проводить испытания на воздействие вибрации по заданной программе поочередно по трем осям.

Стенд для проведения ресурсных испытаний позволял определять термическое сопротивление ТТ в течение планируемого времени эксплуатации при различных температурах пара в диапазоне $+30 \dots +80^\circ\text{C}$. При температуре эксплуатации $+50 \dots +80^\circ\text{C}$ активизируются химические реакции между материалом корпуса и аммиаком, поэтому ТТ исследовались на температурном уровне $+50^\circ\text{C}$ в течение полного периода планируемого срока эксплуатации (минимум 2 года). При этом требовалось выполнение условия полноценного функционирования ТТ, т. е. передачи теплового потока величиной 90 Вт при горизонтальной ориентации ТТ, что соответствовало полуторакратному запасу.

Разработанный стенд (рис. 5) предназначен для одновременного испытания восьми ТТ в течение 100 тыс. ч с технологическими перерывами суммарной длительностью не более 20% от периода ресурсных испытаний. Подвод тепла к ТТ осуществлялся омическим

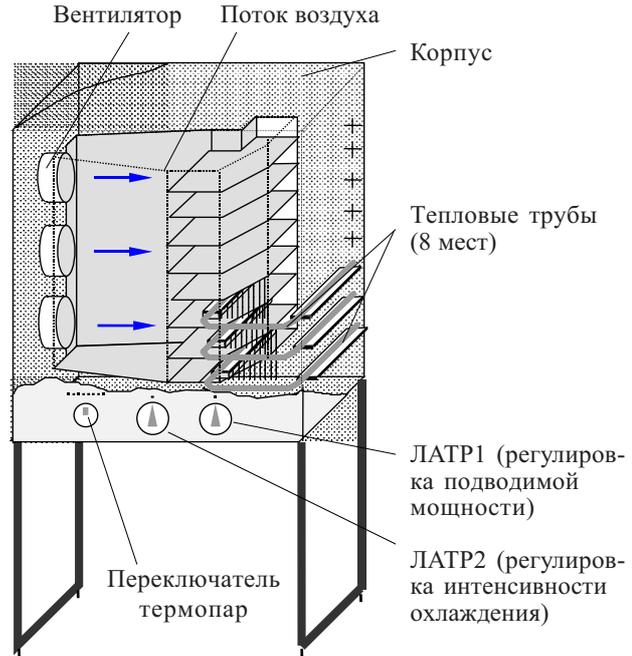


Рис. 5. Стенд для проведения ресурсных испытаний ТТ нагревателем с регулируемой величиной тепловыделения, а отвод тепла — регулируемым потоком воздуха, нагнетаемым вентиляторами из окружающей среды. На каждой ТТ было установлено 8 температурных датчиков, что позволяло определить термическое сопротивление ТТ и коэффициенты теплообмена в зонах теплоподвода и теплоотвода.

Для определения количества неконденсирующегося газа, возникающего в ТТ в результате химической реакции между материалом корпуса и аммиаком или попадающего в ТТ при заполнении ее теплоносителем, измерялось температурное поле в зоне теплоотвода, где через каждые 5 мм были установлены 18 температурных датчиков. Полученное температурное поле позволяет вычислить парциальное давление газа в паровом пространстве ТТ и, в конечном счете, определить массу неконденсирующегося газа. Охлаждение корпуса зоны теплоотвода ТТ осуществлялось потоком газообразного азота, а изменение его расхода позволяло менять уровень температуры пара от -65 до -20°C .

Определение течей теплоносителя является особо важным звеном в последовательности квалификационных испытаний ТТ и выполняется после каждого испытания, в котором возможно нарушение герметичности корпуса. Стенд включал климатическую камеру, оборудование которой предусматривало поиск течи аммиака при максимально возможной температуре ($+80^\circ\text{C}$) и соответствующем внутреннем давлении. Для тестов применялись два химических индикатора аммиака — в виде спрея (ADP-219, производитель American Gas & Chemical Co.Ltd., США) и в виде ленты (проявитель «IFH-COLOR 3» на тканевой основе, разработчик Институт физической химии АН Украины). Наличие течи аммиака определялось визуально по изменению цвета проявителя. Минимальная фиксируемая течь составила $1 \cdot 10^{-7}$ стандартных $\text{см}^3/\text{с}$ для спрея и $2 \cdot 10^{-6}$ стандартных $\text{см}^3/\text{с}$ для ленты.

Созданное стендовое оборудование позволило провести квалификационные испытания. Были получены следующие результаты.

Теплотехнические характеристики.

Термическое сопротивление тепловой трубы определялось на основе обработки экспериментальных данных по зависимости

$$R_{\text{ТТ}} = (\bar{T}_{\text{ев}} - \bar{T}_{\text{кон}}) / Q, \quad (5)$$

где $\bar{T}_{\text{ев}}$, $\bar{T}_{\text{кон}}$ — средние значения температуры корпуса соответственно в зонах теплоподвода и теплоотвода, полученные по показаниям четырех датчиков, расположенных по длине каждой зоны.

Как видно из рис. 6, зависимость термического сопротивления ТТ от температуры пара имеет характер убывающей функции, что обусловлено возрастанием коэффициента теплоотдачи в зоне теплоподвода. Ввиду неравномерности температурного поля по сечению ТТ из-за одностороннего подвода и отвода тепла, в качестве реперного значения для измерения температуры корпуса выбрана точка А, а для измерения t_v — точка В (см. рис. 6, а). Установка датчиков в данной точке сечения позволяет унифицировать измерения для всех ТТ.

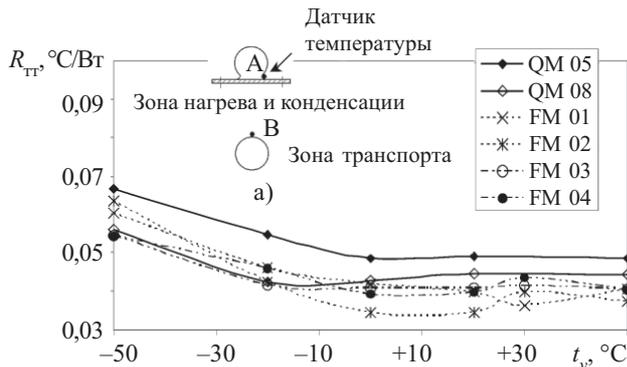


Рис. 6. Зависимость термического сопротивления ТТ от температуры пара при $Q=90$ Вт и схема расположения термодатчиков (а)

Среднее термическое сопротивление при номинальной передаваемой мощности 90 Вт для труб серий QM и FM (8 образцов) описывается зависимостью

$$R_{\text{ТТ}} = 3 \cdot 10^{-6} t_v^2 - 0,0002 t_v + 0,0426, \quad \text{°C/Вт}. \quad (6)$$

Термическое сопротивление ТТ как функция передаваемого теплового потока имеет вид возрастающей линейной функции (рис. 7), что обусловлено воз-

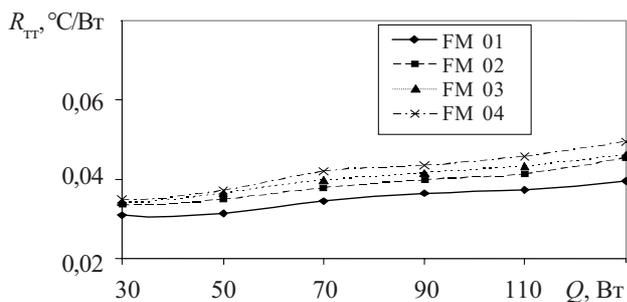


Рис. 7. Зависимость термического сопротивления ТТ от величины передаваемого теплового потока при $t_v=30$ °C

растанием термического сопротивления в зоне конденсации.

Дополнительной информацией о теплотехнических характеристиках ТТ являются зависимости для определения коэффициентов теплоотдачи в зонах нагрева и конденсации, полученные в диапазоне плотности теплового потока $(0,1 \dots 2) \cdot 10^4$ Вт/м² при температурах пара $-50 \dots +50$ °C. Следует отметить, что отклонение термического сопротивления тепловых труб одной серии не превышает 0,01 °C/Вт во всем диапазоне рабочих температур и тепловых потоков.

На рис. 8 приведены экспериментальные зависимости максимального передаваемого теплового потока Q_{max} от температуры пара. Здесь видно, что для рассмотренных типов ТТ значения Q_{max} находятся в диапазоне 90—150 Вт. Для определения величины Q_{max} использовались критерии, разработанные в [4].

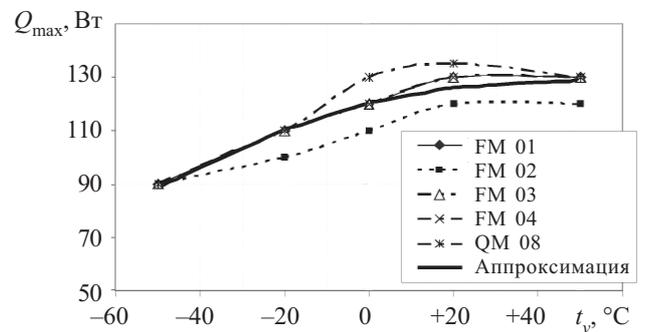


Рис. 8. Зависимость максимального передаваемого теплового потока от температуры пара при горизонтальном положении ТТ

Функция $Q_{\text{max}} = f(t_v)$ аппроксимируется с погрешностью не более $\pm 10\%$ уравнением

$$Q_{\text{max}} = -4,465 \cdot 10^{-3} t_v^2 + 0,4 t_v + 120, \quad \text{Вт}. \quad (7)$$

Отметим, что максимум параметра качества теплоносителя $N = \sigma r / \nu$ (где σ — поверхностное натяжение, r — скрытая теплота парообразования, ν — кинематическая вязкость теплоносителя), определяющего теплопередающие возможности ТТ, находится для аммиака в диапазоне температур $-30 \dots -10$ °C. Из рис. 8 видно, что максимум функции $Q_{\text{max}} = f(t_v)$ достигается при более высоких температурах пара. Этот факт можно объяснить преобладающим влиянием на величину Q_{max} размеров области жидкого теплоносителя в зоне испарения, которая увеличивается в длину с ростом температуры пара. Установленное поведение функции $Q_{\text{max}} = f(t_v)$ согласуется с результатами исследований других научных коллективов, например [10].

Исследовалось влияние изменения положения зоны теплоподвода относительно зоны теплоотвода по вертикали (h) на теплопередающие способности тепловой трубы. ТТ поворачивали так, что продольные образующие фланцев оставались в горизонтальной плоскости. Измерение Q_{max} проводилось при разных значениях угла наклона ϕ плоскости изгиба ТТ относительно горизонтальной плоскости. Так как капиллярная структура исследуемых ТТ является весьма чувствительной к ориентации ТТ в пространстве от-

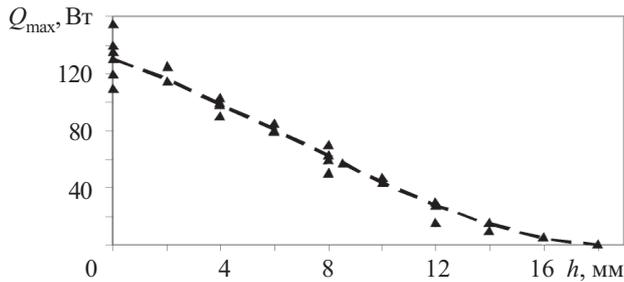


Рис. 9. Влияние положения зоны теплоподвода относительно зоны теплоотвода на теплопередающую способность ТТ при $t_v = +20^\circ\text{C}$

носительно сил гравитации, точность измерения h должна быть на уровне $\pm 0,15$ мм.

Экспериментальные данные, полученные для восьми ТТ при температуре пара $+20^\circ\text{C}$, (рис. 9) обобщаются зависимостями:

$$Q_{\max} = 0,022552h^3 - 0,45135h^2 - 6,4184h + 130,5 \quad (8)$$

или

$$Q_{\max} = 1,7575\varphi^3 - 8,221\varphi^2 - 27,473\varphi + 130,5. \quad (9)$$

Здесь h — в миллиметрах, φ — в градусах.

Тесты на способность ТТ к запуску проводились в температурном диапазоне $-50...+50^\circ\text{C}$ при минимальной тепловой мощности, равной 5 Вт, и мощности, равной $0,8Q_{\max}$, что составляло 50—110 Вт в зависимости от температурного уровня. Все исследованные ТТ (5 макетов) запускались без осложнений.

Тест на способность ТТ восстанавливать теплотехнические характеристики после нарушения функционирования проводился следующим образом. Тепловую трубу при наличии тепловой мощности резко поворачивали на угол $\varphi = 90^\circ$. Из-за слива теплоносителя зона теплоподвода перегревалась относительно зоны конденсации. После достижения заданной величины перегрева ТТ возвращали в горизонтальное положение и фиксировали время, требуемое для восстановления исходных характеристик. Все испытанные ТТ восстановили свои исходные характеристики в течение 30, 60 и 110 с при значениях перегрева 10, 15 и 20°C , соответственно. Детальное описание этого вида испытаний приведено в [9].

В исследованиях [8] по определению количества неконденсирующегося газа, образовавшегося в ТТ, было установлено, что в среднем оно составляет $1,1 \cdot 10^{-5}$ моль $\pm 30\%$. Полученная величина хорошо согласуется с [10], где для ТТ подобного типа приведены значения $(1...10) \cdot 10^{-5}$ моль.

Воздействие условий эксплуатации.

При обработке результатов испытаний, полученных в [8], была определена средняя величина разрывного давления — 180 бар при температуре корпуса 180— 200°C . Разрыв корпуса происходил в различных местах ТТ — как в механически обработанных зонах, так и в необработанных. Это позволило предположить, что место разрыва связано с неравномерностью толщины стенки корпуса, возникающей в процессе экструзии, а также с наличием центров механических напряжений.

После испытаний ТТ на воздействие вибрации их теплопередающие характеристики, термическое сопротивление, герметичность и геометрические размеры не изменились.

Термоциклирование являлось наиболее существенным термомеханическим испытанием на герметичность сварных соединений ТТ и практически не повлияло на их теплопередающие характеристики и термическое сопротивление. Все ТТ прошли тесты в объеме 48 циклов без нарушения герметичности и изменения теплотехнических свойств. При увеличении количества циклов до 200 на одной из ТТ появились микротечи аммиака (на глухом доннышке корпуса) вследствие развития микротрещин. После доработки технологии герметизации все ТТ выдержали без нарушения герметичности планируемые 300 циклов изменения температуры.

Тест, имитирующий влияние температуры хранения, не выявил нарушений в параметрах ТТ.

Ресурсные испытания пяти тепловых труб, изготовленных по однотипной технологии, проводились при $t_v = +50^\circ\text{C}$ и $Q = 90$ Вт для определения их работоспособности в течение 40000 ч. Изменение термического сопротивления, определяемое как отношение текущего значения к начальному, приведено на рис. 10. Наблюдаемые на рисунке отклонения объясняются

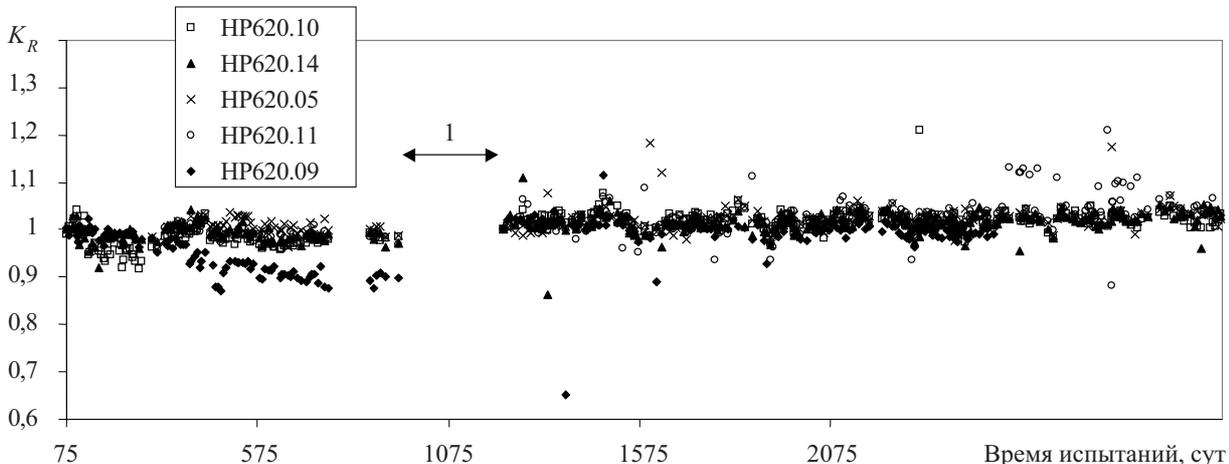


Рис. 10. Относительное изменение термического сопротивления K_R в течение ресурсных испытаний (1 — остановка стенда для проведения исследований по определению количества неконденсирующегося газа)

погрешностью, возникающей при измерении малых (около 2,5°C) величин перепада температуры в ТТ, и возможными неконтролируемыми изменениями ориентации частей ТТ относительно горизонтальной плоскости.

Начатые в 1998 г. испытания продолжаются и сейчас. Общее время наработки составляет более 3200 суток. Испытуемые тепловые трубы изменили свое термическое сопротивление в пределах погрешности измерений.

Тепловые трубы, прошедшие испытания в соответствии со стандартом PSS-49, уже на протяжении 5 лет успешно эксплуатируются в составе системы теплового контроля микроспутника на околоземной солнечно-синхронной орбите (высота 568 км) и сохраняют свои теплотехнические характеристики без отклонений величин, полученных при квалификационных испытаниях.

Использование на практике стандарта PSS-49 для квалификационных испытаний характеризуется следующими трудозатратами. Подготовка стендового оборудования (8—10 стендов) для проведения испытаний достаточно трудоемка и требует примерно 48 человеко-месяцев. Трудоемкость проведения самих испытаний по PSS-49 примерно в 2—4 раза выше, чем при испытаниях по применявшимся ранее программам.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Низкотемпературные тепловые трубы для летательных аппаратов / Под ред. Г. И. Воронина.— М.: Машиностроение, 1976.

2. Белан Н. В., Безручко К. В., Елисеев В. Б., Романкевич А. В. Применение тепловых труб в бортовых энергосистемах летательных аппаратов.— Харьков: ХАИ, 1984.

3. Spacecraft thermal control handbook. Vol. 1.— The Aerospace Press, El Segundo, California; American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., Reston, Virginia.— 2002.— P. 489—522.

4. ESA PSS-49 (TST-01). Issue 2. Qualification requirements to heat pipes.— 1983.

5. Brieß K., Bärwald W., Lura F. et al. The BIRD mission is completed for launch with the PSLV-C3 in 2001 // In Digest of 3rd International Symposium of IAA “Small Satellites for Earth Observation”.— Berlin.— 2001.— P. 323—326.

6. Baturkin V., Zhuk S., Olefirenko D., Rudenko A. Thermal qualification tests of longitudinal ammonia heat pipes for using in thermal control systems of small satellites // IV Minsk International Seminar “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators”.— Minsk, Belarus.— 2000.— P. 261—269.

7. Батуркин В. М., Олиференко Д. Н., Руденко А. И. Определение количества неконденсирующегося газа в аммиачных алюминиевых тепловых трубах // Промышленная теплотехника.— 2003.— Т. 25, № 5.— С. 28—31.

8. Руденко А. И., Батуркин В. М., Жук С. К., Олиференко Д. Н. Экспериментальное исследование тепловой трубы для космических аппаратов // Промышленная теплотехника.— 2002.— Т. 24, № 6.— С. 51—55.

9. Baturkin V., Olefirenko D. Research on axially grooved heat pipe heat transfer characteristics in ground tests // 31 ICES.— Orlando, Florida.— 2001.— Report N 2001-01-2237.

10. Chritine Hoa, Benoit Demolder, Alain Alexandre. Roadmap for developing heat pipes for ALCATEL space’s satellites // Proceedings of 12th International Heat Pipe Conference.— Moscow, Russia.— 2002.— P. 235—240.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Р. Пис. Обнаружение неисправностей в аналоговых схемах.— М.: Техносфера, 2006.— 184 с.

Эта книга предназначена для инженеров, которые проектируют или обслуживают все виды электронных схем, — как аналоговых, так и цифровых. А также для всех, кто интересуется компьютерами, микропроцессорами, программным обеспечением.

Первая глава — ключ к обнаружению неисправностей в электронных схемах и правильному пониманию проблем. В последующих главах подробно освещены способы обнаружения неисправностей в пассивных и активных компонентах схем, в печатных платах и соединениях. В этой книге подробно описаны конкретные примеры ошибок и способы их предотвращения, перечислены все наиболее опасные ситуации, которые могут возникнуть, а также все возможные отказы и методы их устранения.

НОВЫЕ КНИГИ



Уразаев В. Г. ТРИЗ в электронике.— М.: Техносфера, 2006.— 352 с.

В книге «ТРИЗ в электронике» приведены базовые сведения об основных элементах теории решения изобретательских задач (ТРИЗ), необходимые и достаточные для первоначального ознакомления.

Отличительная особенность этой книги заключается в том, что она основана на собственном практическом опыте автора по использованию инструментария ТРИЗ в области электроники. Как разработать принципиально новую технологию, как установить причины брака в производственном процессе? Ответить на эти вопросы вам поможет эта книга.

Отдельные главы посвящены использованию элементов ТРИЗ в нанотехнологии, в области химических технологий, технологии изготовления печатных плат и влагозащиты электронной техники. Книга предназначена для самого широкого круга читателей. Очевидно, максимальный интерес она представляет для читателей, имеющих отношение к области электроники в широком понимании этого слова, и/или для читателей, склонных к творческому мышлению.

Д. ф.-м. н. Д. А. УСАНОВ

Россия, Саратовский государственный университет

Перепечатано из журнала
"Известия вузов. Электроника", № 5'2006

ШКОЛА А. Ф. ИОФФЕ КАК ПРИМЕР ЕДИНСТВА НАУКИ, ОБРАЗОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА

Рассмотрены основные признаки, характеризующие научную школу А. Ф. Иоффе. Отмечается близость принципов, заложенных в основу школы Иоффе, идеям и технологиям современной рыночной, инновационной экономики.

В 2005 г. исполнилось 125 лет со дня рождения академика А. Ф. Иоффе.

Роль А. Ф. Иоффе в развитии физики подробно освещалась еще при его жизни, начало творческого периода которой совпало с революцией в физике, связанной с зарождением и становлением квантовой механики, квантовой теории твердого тела, ядерной физики, физики полупроводников и других научных направлений современной физики. Читая воспоминания об Иоффе, написанные его биографами и многочисленными учениками [1—4], невольно обращаешь внимание на то, что в качестве главного достижения его жизни выступают не только и не столько полученные им лично многочисленные блестящие научные результаты, а и формирование целых поколений научной школы Иоффе. Из этой школы вышло более десяти академиков АН СССР (А. П. Александров, А. И. Алиханов, Л. А. Арцимович, П. Л. Капица, И. К. Кикоин, Ю. Б. Кобзарев, Г. В. Курдюмов, И. В. Курчатов, Л. Д. Ландау, П. П. Лукирский, Н. Н. Семенов, В. М. Тучкевич, Ю. Б. Харитон и др.). Не случайно очерк об А. Ф. Иоффе, вошедший в число популярных очерков в сборник о наиболее выдающихся ученых в области физики, называется «Основатель советской школы физиков». Нобелевский лауреат академик Н. Н. Семенов в сборнике «Воспоминания об А. Ф. Иоффе» пишет: «Я думаю, что во все времена ни у одного народа не было физика, который бы, подобно Иоффе, вырастил такое огромное число крупных ученых из своих учеников». Один из его учеников — С. Е. Бремер основной жизненной миссией, которую выполнил Иоффе, называет «создание первой русской школы физики и подъем нашей физики от почти нулевого уровня до уровня современной передовой науки». Повторяя слова Н. Н. Семенова, опубликованные им в статье «А. Ф. Иоффе и его школа», посвященной столетию со дня его рождения, можно сказать, что школа Иоффе продолжает развиваться и сейчас через учеников его учеников. Характеризуя школу А. Ф. Иоффе, Ф. Ф. Воль-

кенштейн называет ее наиболее обширной, быстро-растущей и новаторской.

Начальный период становления школы Иоффе совпал со сменой общественного строя в России. В царской России практически вся исследовательская работа велась при кафедрах высших учебных заведений. Советская власть поддержала инициативу ученых по созданию ряда научных учреждений. В 1918 г. по предложению Иоффе в Петрограде был создан физико-технический отдел во вновь организованном рентгенологическом и радиологическом институте. В 1923 г. этот отдел был реорганизован в Физико-технический институт (ФТИ). Отметим, что институты создавались несмотря на существующую в стране разруху, голод, гражданскую войну. Свою научную деятельность Иоффе сочетал с педагогической. В 1906 г. он начал работать в Петербургском политехническом институте, в 1913 г. он стал профессором, а в 1919 г. был избран деканом созданного по его инициативе физико-механического факультета. Опыт взаимоотношений государства, науки, образования и производства в этот период несомненно актуален и для нашего времени, когда в России произошла очередная смена экономической и общественно-политической формации, когда вновь стоит вопрос о путях развития российской науки, образования, экономики. Конечно же наиболее ценным из этого опыта является то, что создало почву для успеха отечественной науки и образования того времени и, в частности, школы Иоффе. В сфере интересов современного российского государства сегодня — необходимость сохранения и развития научных школ. Не случайно на государственном уровне действуют программы поддержки ведущих научных школ и научно-педагогических коллективов.

Какой же видели «школу Иоффе» его ученики? Вот что писали об этом А. Р. Регель и Л. С. Стильбанс: «...основными признаками школы, как впрочем и любого другого творческого объединения, являются единство образа мыслей, единство целей и единство действий. Школа — это не маленькая или большая группа эпигонов, повторяющих то, что в основном сделал их учитель, а коллектив, соединенный одинаковым отношением к своей специальности, к людям и жизни». Секрет успеха школы Иоффе во многом определялся его позицией по отношению к взаимосвязи между фундаментальными и приклад-

ными аспектами науки, по поддержанию в коллективе баланса между теорией и практикой, его постоянному желанию проложить «мост» между ними, доводить исследования до их глубокого понимания, с одной стороны, и внедрения в народное хозяйство — с другой.

Близкое понимание сути естественно-научной школы высказывал Н. Н. Семенов. Он считал, что «под школой надо понимать воспринятый от учителя метод мышления и подхода к научному исследованию природы». По словам А. Р. Регеля и Л. С. Стилбанса, «не было физика, который понимал бы значение теории лучше, чем Абрам Федорович, но он мало интересовался абстрактной теорией, оторванной от эксперимента, от реальной картины физических явлений».

Такая позиция нашла свое выражение как в научной, так и в педагогической деятельности Иоффе. Значение такой позиции особенно важно отметить сегодня, когда в силу различных причин, по мнению многих ученых, реальный эксперимент стал вытесняться из научной и педагогической практики виртуальным, численным. Иоффе, как писал один из его учеников В. Н. Кондрагьев, поставил задачу привить будущим ученым и инженерам глубокие знания теории в тесном сочетании с актуальными задачами практики. Студенты на физико-механическом факультете Петроградского политехнического института сочетали учебу с занятиями наукой в лабораториях Физико-технического института, общались с преподавателями в учебных аудиториях и научных лабораториях.

«Знания должны приобретаться параллельно с разработкой изобретений, с исследовательской работой», — писал Иоффе в своей автобиографической статье «Моя жизнь и работа» [5].

Такая обстановка способствовала быстрому росту молодых ученых, достижению высоких темпов и высокого качества научной работы.

Выпускники физико-механического факультета должны были изучить достижения современной физики и одновременно освоить основы материаловедения и конструирования. Важной составляющей обучения было решение задач по физике, математике и механике. По мнению Н. Н. Семенова, такая система обучения привела к поразительным успехам. Дипломные работы студентов представляли собой, как правило, законченные научные работы, которые обычно печатались в наших, а иногда и в зарубежных журналах. Многих преподавателей Иоффе привлекал для работы в ФТИ. Он считал, что такой подход приведет к тому, что техники будут лучше понимать физику, а физики будут считать одной из своих задач не только развитие «академической» науки, но и применение ее достижений в промышленности. Именно поэтому Иоффе назвал свой институт не физическим, а физико-техническим. По свидетельству А. Ф. Чудновского, Иоффе считал, что научная и преподавательская работа дополняют друг друга и способствуют формированию широко образованного физика. Он много раз повторял, что чтение лекций развивает важную для ученого способность концентрированно и последовательно излагать мысли, шлифует язык из-

ложения, способствует формированию логического и стройного мышления. Отметим, что в последующем введенная Иоффе модель обучения получила распространение в масштабах страны, и, по-видимому, именно с такой концепцией отечественного естественно-научного и технического образования связаны общепризнанные его успехи.

Когда к концу 1920-х — началу 1930-х годов число научных работников в ФТИ превысило 500, Иоффе приступил к созданию сети таких институтов в масштабах страны. В 1929 г. был создан Харьковский ФТИ, затем при непосредственном участии Иоффе такие институты были организованы в Днепропетровске, Томске, Свердловске и в других промышленных центрах. Всего было создано 16 институтов. Сам ФТИ в 1930 г. был разделен на три отдельных института: ФТИ, директором которого остался Иоффе, электрофизический институт, который возглавлял А. А. Чернышов, и институт химической физики во главе с Н. Н. Семеновым. Впоследствии еще ряд лабораторий ФТИ по мере развития трансформировались в институты. Так, в частности, возник Институт атомной энергии, который возглавил ученик Иоффе И. В. Курчатов. В 1972 г. из ФТИ выделился Институт ядерной физики. В таком выделении из ФТИ новых институтов, научное направление работ в которых относилось к одной из физических проблем, можно увидеть движение по пути все большей специализации научных исследований. Отражением этого процесса в системе профессионального образования было открытие узкопрофильных учебных заведений, увеличение числа специальностей, по которым велась подготовка молодых специалистов. То обстоятельство, что именно ФТИ являлся первоначальным источником зарождения ряда таких институтов, было связано с необычайной широтой фронта научных исследований, организованных Иоффе, его разносторонними научными интересами и, наконец, стремлением как можно шире использовать достижения физики в различных отраслях народного хозяйства. Так, например, Иоффе постоянно выступал против отсталости в приборостроении, предназначенном для сельского хозяйства, и связанного с этим слабого контроля за производством сельскохозяйственной продукции. «В сельском хозяйстве физические методы исследования и контроля практически отсутствуют... А между тем необходимость участия физики в сельскохозяйственном производстве понимали передовые русские агрономы еще в XVIII в.», — писал он в 1955 г. [6]. Нет необходимости доказывать, что такая постановка вопроса актуальна и сегодня.

В 1932 г. по инициативе Иоффе в Ленинграде был организован Агрофизический институт. По воспоминаниям И. Б. Ревута, идею его создания поддержал Н. И. Вавилов, который был своего рода учредителем этого института и главным консультантом Иоффе по вопросам биологии. А. Ф. Иоффе считают основателем советской школы агрофизиков. Он связывал с применением достижений физики в сельском хозяйстве открытие огромных перспектив. И. Б. Ревут писал о предсказании Иоффе крупнейших открытий в области биологии на основе достижений точ-

ных наук. Прогресс в развитии народного хозяйства вообще и сельского хозяйства в частности Иоффе связывал с развитием энергетики. Под его руководством были выполнены работы по уменьшению расхода жидкого топлива в сельском хозяйстве, давшие государству многомиллионную экономию.

Лаборатория в ФТИ, в которой велись исследования по биофизике, впоследствии выросла в Институт биофизики АН СССР.

Деятельность Иоффе в области агрофизики и биологии можно считать яркой иллюстрацией плодотворности исследований на стыке различных научных дисциплин по междисциплинарным научным направлениям. Отметим, что именно междисциплинарность является ключевым моментом концепции фундаментализации современного университетского образования. По свидетельству Ф. Ф. Волькенштейна, интерес к проблемам, находящимся на стыке физики с другими науками, — характерная черта Иоффе. Он называл такие проблемы многообещающими и, в то же время, в силу сложившихся исторических причин, — наиболее медленно развивающимися.

А. Ф. Иоффе считал необходимым введение в обиход медицины всего арсенала физических методов исследования. Именно поэтому он приветствовал основание в 1921 г. во главе с известным врачом-рентгенологом М. И. Неменовым Государственного рентгенологического института. Отметим, что «медицинская физика» как учебная специальность в вузах России получила право на существование лишь в 1990-е годы.

Ю. А. Храмов в биографическом справочнике, посвященном физикам, написал об А. Ф. Иоффе: «Особенно значительный вклад им был сделан в физику и технику полупроводников».

А. Р. Регель и Л. С. Стильбанс, ссылаясь на статью А. Ф. Иоффе «Полупроводники — новый материал электротехники», опубликованную им в 1931 г. в журнале «Сорена» (Социалистическая реконструкция и наука), говорят о предсказании Иоффе более чем за 20 лет до того, как это было понято научным сообществом, огромного значения полупроводников для технического прогресса. Н. Н. Семенов высказывал мнение о том, что А. Ф. Иоффе следует считать первым в мире открывателем полупроводимости, широко поставившим эту научную проблему и получившим в этой области основные принципиальные результаты. Экспериментально необычные свойства материалов, впоследствии отнесенных к полупроводникам, были установлены еще М. Фарадеем в 1833 г., однако для понимания этих свойств потребовалось использовать достижения квантовой механики, а для их успешного применения — физики твердого тела, радиотехники, радиофизики, оптики, химии, материаловедения и ряда других физических и инженерных дисциплин. В этом отношении физика полупроводников относится к науке, синтезировавшей в себе достижения целого ряда научных дисциплин. Отметим, что это одно из наиболее динамично развивающихся научных направлений, из которого выросли такие его разделы как опто-, микро- и нанoeлектроника. Именно с нанотехнологиями и нанoeлектрони-

кой связывают наиболее перспективные применения физики в XXI в. Школе Иоффе принадлежит объяснение основного классификационного признака полупроводника — особого характера температурной зависимости его электропроводности, открытие квазичастицы — экситона, установление полупроводниковых свойств у соединений типа $A^{III}B^V$, и, наконец, именно в ФТИ имени А. Ф. Иоффе была впервые показана Ж. И. Алферовым возможность создания полупроводниковых лазеров, работающих при комнатной температуре.

В странах с развитой рыночной экономикой реализуется сегодня так называемая инновационная модель развития, базовым и начальным звеном которой является создание изобретений, имеющих перспективу использования в качестве продукта рынка. С такой моделью связаны соответствующая модернизация профессионального образования и требования, предъявляемые государством к направленности научных исследований. Иоффе писал: «Нужно вовлечь в общий план научной работы широко развернутое рабочее изобретательство, а рабочий-изобретатель должен стать основным ядром научных кадров» [5]. Понимание Иоффе значимости такого направления деятельности ученых и инженеров хорошо иллюстрируется личной поддержкой Иоффе создателей наиболее значимых изобретений и открытий того времени. По свидетельству М. М. Бредова, Иоффе активно поддержал работы Ю. Б. Кобзарева по созданию радиолокации, спасавшей Ленинград от вражеских налетов уже в 1939 г., вопреки резкой их критике со стороны многих специалистов. Иоффе лично способствовал присуждению степени кандидата наук без защиты диссертации автору пионерских изобретений в области полупроводниковой электроники О. В. Лосеву, формально не завершившему в свое время обучение в университете. Иоффе представил для опубликования в Докладах Академии наук СССР статьи О. В. Лосева, посвященные открытому им явлению свечения карборундовых детекторов при прохождении через них тока, впоследствии названному электролюминесценцией, и тем способствовал установлению приоритета отечественной науки в этом вопросе. По свидетельству Е. Ф. Гросса, Иоффе был среди немногих ученых, которые заинтересовались, сразу поняли и поддержали его пионерские работы по обнаружению спектра экситонов, признанные впоследствии научным открытием.

Можно привести еще много подобных примеров. Вся деятельность школы Иоффе и его самого является блестящим примером инновационной деятельности в современном ее понимании. Одной из истин современной рыночной экономики является рискованный (венчурный) характер инноваций. Увлеченный перспективами, открывающимися при внедрении разрабатываемых им идей, Иоффе далеко не всегда мог реализовать их в устанавливаемые в условиях плановой экономики сроки и тем самым навлекал на себя нарекания и упреки [7]. Еще одно затруднение, с которым он постоянно встречался, состояло, по свидетельству Я. Г. Дорфмана, в том, что даже выдающиеся представители промышленности редко могли

сформулировать крупные перспективные проблемы и ограничивались запросами, связанными с повседневными, сиюминутными задачами производства, нацеленными не на создание принципиально новых разработок, а лишь на улучшение уже существующих изделий. Нет нужды доказывать, что в подавляющем числе случаев подобная ситуация характерна и для настоящего времени. Такая ситуация скорее всего связана с отсутствием достаточной системы поддержки и стимулов для инновационной деятельности — как во время, когда работал Иоффе, так и в сегодняшние дни, когда рыночные технологии в России находятся все еще в стадии формирования. Именно с неоправдавшимися надеждами, возлагавшимися Иоффе на результаты некоторых проектов, связывал в биографическом очерке о нем В. Я. Френкель его вынужденный уход в 1950 г. с поста директора ФТИ и переход в 1952 г. на пост руководителя вновь организованной Лаборатории полупроводников Академии наук СССР, в 1955 г. преобразованной в возглавленный им Институт полупроводников АН СССР — последний из организованных им институтов. Заслуги и достижения школы Иоффе в физике полупроводников отмечали в своих нобелевских лекциях Дж. Бардин и Ж. Алферов.

Анализируя опыт, накопленный за многие годы существования школы Иоффе, сформированные в рамках этой школы подходы к путям развития науки и образования в нашей стране, способы преодоления трудностей, характерных для этой сферы деятельнос-

ти, можно найти ответы на наиболее острые вопросы многочисленных дискуссий, ведущихся и сегодня, и избежать ошибок при выборе решений, возможность которых нельзя исключить во времена резких общественных перемен, сформулировать своего рода практические рецепты по принятию неизбежных мер по модернизации доставшейся в наследство формирующемуся строю системы взаимоотношений между наукой, образованием и производством. Опыт школы Иоффе в этом отношении может представлять наибольший интерес, так как многие принципы, заложенные в основу именно этой школы, по-видимому, наиболее близки идеям и технологиям современной рыночной, инновационной экономики.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Макаева Г. П., Медведев П. Е. Рассказы о физиках.— Минск: Высшая школа, 1966.
2. Воспоминания об А. Ф. Иоффе. Сборник статей.— Л.: Наука, 1972.
3. Проблемы современной физики. Сборник статей.— Л.: Наука, 1980.
4. Храмов Ю. А. Иоффе Абрам Федорович // В кн.: Физики: биограф. справочн. / Под ред. А. И. Ахиезера.— М.: Наука, 1983.
5. Иоффе А. Ф. О физике и физиках.— Л.: Наука, 1977.
6. Иоффе А. Ф. Физика и сельское хозяйство.— М., Л.: Изд-во АН СССР, 1955.
7. Френкель В. Я. Новые материалы об обсуждении в Физико-техническом институте старой проблемы взаимоотношения фундаментальных и прикладных исследований // В кн.: Чтения памяти А. Ф. Иоффе.— СПб: Наука, 1993.— С. 178—186.

БИБЛИОГРАФИЯ

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ,
ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2006 г.

Техническая политика

- Использование сети электропитания для построения информационных систем. Семенко А. И., Юрчук А. П. 2
 Светоизлучающие диоды белого света: состояние и основные тенденции развития. Струхляк Н. Я., Заячук Д. М., Круковский С. И., Босый В. И. 3
 Производство фотоэлектрических преобразователей и рынок кремниевого сырья в 2006—2010 гг. Наумов А. В. 4
 Ростовое оборудование для производства полупроводящего GaAs методом Чохральского. Ковтун Г. П., Щербань А. П. 6
 Бессвинцовая технология: последний отчет. Фьелстад Дж. 6

Электронные средства: исследования, разработки

- Прибор «Регион» для космического эксперимента «Кольцо» на борту МКС. Барабанов Н. А., Бандуристий Л. М., Венедиктов Ю. И., Довгаль С. Г., Селиванов Ю. А., Черемных О. К., Безруких В. В., Гдалевич Г. Л. 1
 Алгоритм проектирования РЭС с многоуровневым электромонтажом с учетом электромагнитной совместимости. Кондрашенков И. С. 1
 Разработка и исследование газового лазера для телекоммуникационных систем. Бондарчук Я. М. 3
 Пьезокерамические электроакустические преобразователи мембранного типа. Спиридонов Н. А., Гусакова Л. Г., Кременев О. Г., Спиридонов В. Н. 3

- Устройство для управления шаговым двигателем на ПЛИС. Вычужанин В. В. 3
 Способ модуляции-демодуляции сигналов с квадратурным изменением угловой компоненты. Коханов А. Б. 4
 RSpice-моделирование оптико-электронных локаторов. Янко В. В. 4
 Емкость тонкого проводника прямоугольного сечения в микросхеме. Конников И. А. 4
 Задачи математического обеспечения процессов проектирования несущих конструкций радиоэлектронных средств. Бырка Р. В. 5
 Взаимовлияние объектов малых размеров в микросхеме. Конников И. А. 6
 Электрическое сопротивление контакта тонкопленочных резисторов. Лугин А. Н., Оземша М. М. 6
 Компьютерная система отбора кремниевых диодов для генераторов случайных числовых последовательностей. Барановский О. К., Кучинский П. В., Рутковский И. З. 6

Техника сверхвысоких частот

- Системы охранной сигнализации на основе электромагнитного потока СВЧ-сигнала и фазообразующих средств. Виноградов Г. М., Смаглюк В. В., Колесник К. В. 1
 Конструктивно-технологические особенности автономных ГИС КВЧ на диодах Ганна. Воторопин С. Д. 2
 Статистические характеристики интенсивности мешающих сигналов в безэховой камере туннельного типа. Демьянчук Б. А. 2