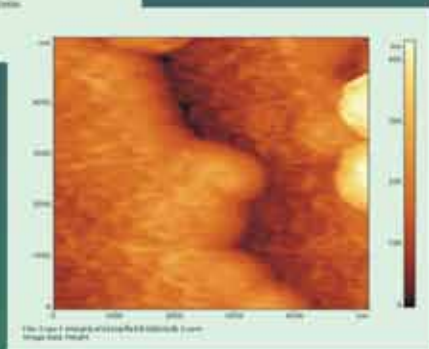
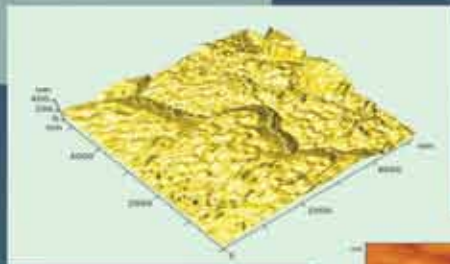
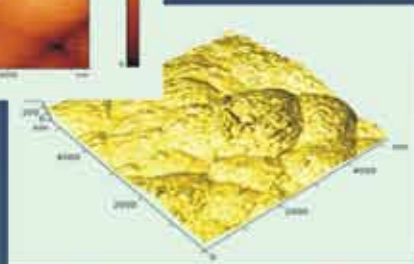
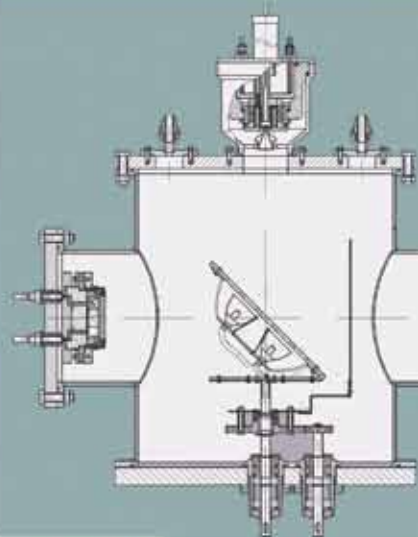




ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ



К статье
«Нанесение тонких пленок в вакууме
на подложки из синтетического опала»

2(56) 2005

МАРТ – АПРЕЛЬ



6-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

23—27 мая 2005 года
Украина, г. Одесса

- ◆ **Обработка сигналов. Схемотехника. Системотехника**
- ◆ **Информационные технологии. Компьютерные системы и сети**
- ◆ **Проектирование, конструирование, производство и контроль электронных средств**
- ◆ **Функциональная электроника. Микро- и нанотехнологии**
- ◆ **Экологический мониторинг**

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

Реквизиты для связи
E-mail <tkea@odessa.net>
тел./факс +38 (048) 728-49-46,
тел. +38 (048) 728-18-50.
Секретарь Оргкомитета "СИЭТ-2005"
Тихонова Елена Анатольевна

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

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

Международный

Каталог периодических изданий Российской Федерации, стран СНГ и Балтийского региона. МК-PERIODICA. Индекс 71141.

В Интернете

На сайте МК-PERIODICA (www.periodicals.ru). Индекс 71141.

По Украине.

Отделения связи. «Каталог видань України». Индекс 23785.

Подписное агентство «Идея», www.idea.com.ua. Индекс 11146.

Тел./факс +38 (062)381-09-32.

Подписное агентство «KSS», www.kss.kiev.ua. Индекс 20363.

Тел. +38 (044)464-02-20.

Подписное агентство «ПрессЦентр». E-mail: info@prescentr.kiev.ua.

Тел./факс +38 (044) 536-11-75, 536-11-80.

По России.

Отделения связи. Индекс 71141.

Представительство журнала «ТКЭА» в России:

192286 С.-Петербург, п/о 286, п/я 416; «ЭРА».

E-mail: era48@mail.ru, тел. +7 (812)595-40-89.

Через редакцию «ТКЭА».

Адрес редакции: Украина, 65005, г. Одесса, ул. Прохоровская, 45.

E-mail: tkea@odessa.net, web-сайт: tkea.wallst.ru,

тел. +38 (048)728-18-50, 728-11-89,

тел./факс 728-49-46.

Редакция: Е. А. Тихонова, А. А. Ефименко, Е. Н. Курдюкова,
Л. М. Лейдерман, А. Н. Онищенко, М. С. Хлопова.

Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.

Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корсуньяк.



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

Подписано к печати 26.04 2005 г. Формат 60×84 1/8.

Печать офсетная. Печ. л. 8,0. Уч.-изд. л. 9,9. Тираж 700 экз. Заказ № 17.

Издательство «Нептун-Технология»

(65028, г. Одесса, ул. Б. Хмельницкого, 59).

Отпечатано в типографии издательства «ТЭС»

(65012, г. Одесса, ул. Канатная, 81/2).

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

Год издания 29-й

Год регистрации 1992

Регистрационный номер
КВ 2092 от 07.06.96 г.

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

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР
К.т.н. В. М. Чмиль

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

УЧРЕДИТЕЛИ

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

Техническая политика

Система базовых несущих конструкций радиоэлектронных средств:
состояние проблемы. Ю. С. Романова, К. Ю. Шерин 3

Система сбора и обработки полетной информации. М. Д. Скубилин,
А. В. Письменов, С. Г. Головин, С. Е. Бублей 6

Электронные средства: исследования, разработки

Интегрально-оптические волноводные дисперсионные элементы для
ВОЛС. В. Ш. Берикашвили, Н. Т. Ключник, К. Н. Костенко, М. Я.
Яковлев 10

Модель сумматора с параллельным выполнением микроопераций.
О. Н. Паулин, Ф. С. Шапо, Н. И. Синегуб 17

Определение коэффициентов конвективного теплообмена в тер-
моэлектрических каталитических генераторах. В. Я. Михайловский,
Ю. И. Фединчук 21

СВЧ-техника

Усилители мощности Ку-диапазона для наземной станции спутниковой
связи. Б. Н. Севергин, И. В. Яковлев, П. А. Яцьк, А. Н. Балаба 25

Микроволновый нагреватель с конвективным теплообменом. Б. А.
Демьянчук 28

Системы передачи и обработки сигналов

Оптимизация цифрового фильтра для оценивания фокусировки
изображений в цифровой оптической микроскопии. В. Н. Боровицкий 32

Биомедицинская электроника

Использование электромагнитного излучения в медицине и требо-
вания к построению КВЧ-аппаратов. А. Г. Яцуненко, В. М. Ковто-
нюк, В. Н. Иванов, Ю. Е. Николаенко 41

Сенсоэлектроника. Датчики

Двухволновой сенсор дистанционной селекции естественных поверх-
ностей. И. А. Иванченко, Л. М. Будиянская, Ю. Ф. Ваксман 43

Технологические процессы и оборудование

Монтаж микросборок с подложкой из кремния. В. Г. Спириг 46

Нанесение тонких пленок в вакууме на подложки из синтетического
опала. Ю. В. Панфилов, М. И. Самойлович, Е. В. Булыгина 49

Лазерное текстурирование поверхности предварительно нагретого
монокристалла кремния. Г. И. Крапивко 53

Материалы электроники

Фотохромная чувствительность модифицированных пленок бактерио-
родопсина для устройств молекулярной электроники. Г. Е. Адамов,
Е. П. Гребенников, А. Г. Девятков 56

Формирование гетероструктур GaTe/CdSe для использования в
солнечных элементах. А. А. Балыцкий 59

Диэлектрическая релаксация Гавриляки—Негами. В. В. Новиков,
О. А. Комкова, О. В. Жарова 62

Библиография

Новые книги 40, 45, 55, 58

В портфеле редакции 24

Выставки. Конференции 9, 16, 20, 31, 64, 2-я стр. обл.

2005 № 2 (56)

ТЕХНОЛОГІЯ
ТА
КОНСТРУЮВАННЯ
В
ЕЛЕКТРОННІЙ
АПАРАТУРІ
(російською мовою)

ЗМІСТ

Технічна політика

Система базових несучих конструкцій радіоелектронних засобів: стан проблеми. *Ю. С. Романова, К. Ю. Шерін* (3)
Система збору та обробки польотної інформації. *М. Д. Скубілін, О. В. Письменов, С. Г. Головін, С. Є. Бублей* (6)

Електронні засоби: дослідження, розробки

Інтегрально-оптичні хвилевідні дисперсійні елементи для ВОЛЗ. *В. Ш. Берикашвілі, М. Т. Ключник, К. М. Костенко, М. Я. Яковлев* (10)

Модель суматора з паралельним виконанням мікрооперацій. *О. М. Паулін, Ф. С. Шапо, М. І. Синегуб* (17)

Визначення коефіцієнтів конвективного теплообміну в термоелектричних каталітичних генераторах. *В. Я. Михайловський, Ю. І. Фединчук* (21)

НВЧ-техніка

Підсилювачі потужності Ку-діапазону для наземної станції супутникового зв'язку. *Б. М. Севергін, І. В. Яковлев, П. О. Яцук, А. М. Балаба* (25)

Мікрохвильовий нагрівач з конвективним теплообміном. *Б. А. Дем'янчук* (28)

Системи передачі та обробки сигналу

Оптимізація цифрового фільтра для оцінювання фокусування зображень у цифровій оптичній мікроскопії. *В. М. Боровицький* (32)

Біомедицинська електроніка

Використання електромагнітного випромінювання у медицині та вимоги до побудови КВЧ-апаратів. *А. Г. Яцуненко, В. М. Ковтонюк, В. М. Іванов, Ю. Є. Ніколаєнко* (41)

Сенсоелектроніка. Датчики

Двоххвильовий сенсор дистанційної селекції природних поверхонь. *І. А. Іванченко, Л. М. Будіяньська, Ю. Ф. Ваксман* (43)

Технологічні процеси та обладнання

Монтаж мікрозбірок з підкладинкою із кремнію. *В. Г. Спирін* (46)

Нанесення тонких плівок у вакуумі на підкладинках з синтетичного опалу. *Ю. В. Панфілов, М. І. Самойлович, Є. В. Булигіна* (49)

Лазерне текстування поверхні попередньо нагрітого монокристалу кремнію. *Г. І. Кропивко* (53)

Матеріали електроніки

Фотохромна чутливість модифікованих плівок бактеріородопсина для пристроїв молекулярної електроніки. *Г. Є. Адамов, Є. П. Гребенников, А. Г. Дев'ятков* (56)

Формування гетероструктур GaTe/CdSe для використання в сонячних елементах. *Балицький О. О.* (59)

Діелектрична релаксація Гавриляки–Негамі. *В. В. Новіков, О. А. Комкова, О. В. Жарова* (62)

CONTENT

Technical polytic

The base carrying constructions system of the radio-electronic facilities: issues of the day. *Romanova Yu. S., Sherin K. Yu.* (3)

The system of the tax and processing of the information about flight of the flying device. *Skubilin M. D., Pismenov A. V., Golovin S. G., Bubley S. E.* (6)

Electronic means: investigations, development

Waveguide dispersing elements for fiber-optic communication lines (FOCL). *Berikashvilli V. S., Klyuchnik N. T., Kostenko K. N., Yakovlev M. Ya.* (10)

Adder modelling with parallel carrying out of the microoperations. *Paulin O. N., Shapo F. S., Sinigub N. I.* (17)

Determination of coefficients of heat exchange in thermo-electric catalytic generators. *Mikhailovsky V. Ya., Fedinchuk Yu. I.* (21)

Microwave engineering

Power amplifiers of the Ku band for the ground station of satellite communication. *Severgin B. N., Yakovlev I. V., Yatsyk P. A., Balaba A. N.* (25)

Microwave heater with convection heat exchange. *Dem'yanchuk B. A.* (28)

Systems of transfer and processing of a signal

Optimization of a digital filter for image focus evaluation in digital light microscopy. *Borovytsky V. N.* (32)

Biomedical electronics

Use of electromagnetic radiation in medicine and requirements to the construction of millimeter-wave devices. *Yatsunenkov A. G., Kovtonyuk V. M., Ivanov V. N., Nikolayenko Yu. E.* (41)

Sensoelectronics. Sensors

Two-waved sensor of the distance selection of natural surfaces. *Ivanchenko I. A., Budijanskaja L. M., Vaksman J. F.* (43)

Technological processes and development

Packaging of micromodules on a silicon substrate. *Spirin V. G.* (46)

Thin film deposition on synthetic opal substrate. *Panfilov Yu. V., Samoylovich M. I., Bulygina E. V.* (49)

Laser chasing of surface a single crystal heated up preliminary of Si. *Krapivko H. I.* (53)

Materials of electronics

Photochrome sensitiveness of the modified tapes of bacteriorhodopsin for the devices of molecular electronics. *Adamov G. E., Grebennikov E. P., Devyatkov A. G.* (56)

Formation of GaTe/CdSe heterostructures for solar cells applications. *Balitskii O. A.* (59)

Dielectric relaxation Havriliak–Negami. *Novikov V. V., Komkova O. A., Zharova O. V.* (62)

Ю. С. РОМАНОВА, к. т. н. К. Ю. ШЕРИН

Россия, г. С.-Петербург, Северо-западн. гос. заочн. технический университет, Центр прикладной математики и механики
E-mail: ch_cat@mail.ru, penkshark@mail.ru

Дата поступления в редакцию
15.03 2005 г.

Оппонент д. т. н. Л. С. ЛУТЧЕНКОВ
(НПП "ЭлектроРадиоАвтоматика", г. С.-Петербург)

СИСТЕМА БАЗОВЫХ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ: СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Рассматривается номенклатура, структура и параметры конструктивных элементов и модулей системы БНК РЭС для создания автоматизированных систем управления различного назначения.

Высокий динамизм развития схмотехники, построение радиоэлектронных средств (РЭС) на элементной базе с использованием изделий электронной техники (ИЭТ) сверхвысокой степени интеграции, совершенствование методов формирования информационного сигнала и многие другие достижения науки и техники обусловили необходимость комплексного решения ранее не существовавших или не имевших определяющего значения проблем проектирования несущих конструкций [1].

Стало очевидным, что наиболее рентабельное и радикальное решение большинства проблем создания РЭС различного назначения возможно и целесообразно при проектировании базовых несущих конструкций (БНК). В то же время процесс создания БНК носит, как правило, опережающий, поисковый, оригинальный и долговременный характер, а перспективность принятых при этом технических решений определяет "время жизни" как непосредственно БНК, так и создаваемых на их основе РЭС (см., например, [2—4]).

Определение номенклатуры, структуры и параметров конструктивных модулей системы БНК, на базе которых разрабатываются и изготавливаются РЭС различного схмотехнического и эксплуатационного назначения, представляет собой сложную научно-техническую проблему. Решению ее, а именно созданию унифицированной системы БНК, построенной на единой совокупности деталей и сборочных единиц структурных конструктивных модулей сложной иерархической системы БНК РЭС, уделяется большое внимание и отечественными предприятиями, и целым рядом ведущих зарубежных фирм, например Siemens, Ericsson, Nokia, Marconi, Philips, Alcatel, Schroff Group, Western Electric Company, General Electric Company Telecommunications, Telettra, Fujitsu [5, 6].

Решением проблемы создания унифицированной системы БНК занимались более девяти отраслей промышленности СССР в соответствии с Межотраслевой программой разработки, унификации и стандартизации БНК РЭС общей техники, утвержденной постановлением Госстандарта. В настоящее время эти работы продолжают в более 50 ведущих предприятиях основных отраслей промышленности в соответствии с "Межотраслевой программой унификации, стандартизации и развития БНК РЭС", разработанной Российским агентством по системам управления.

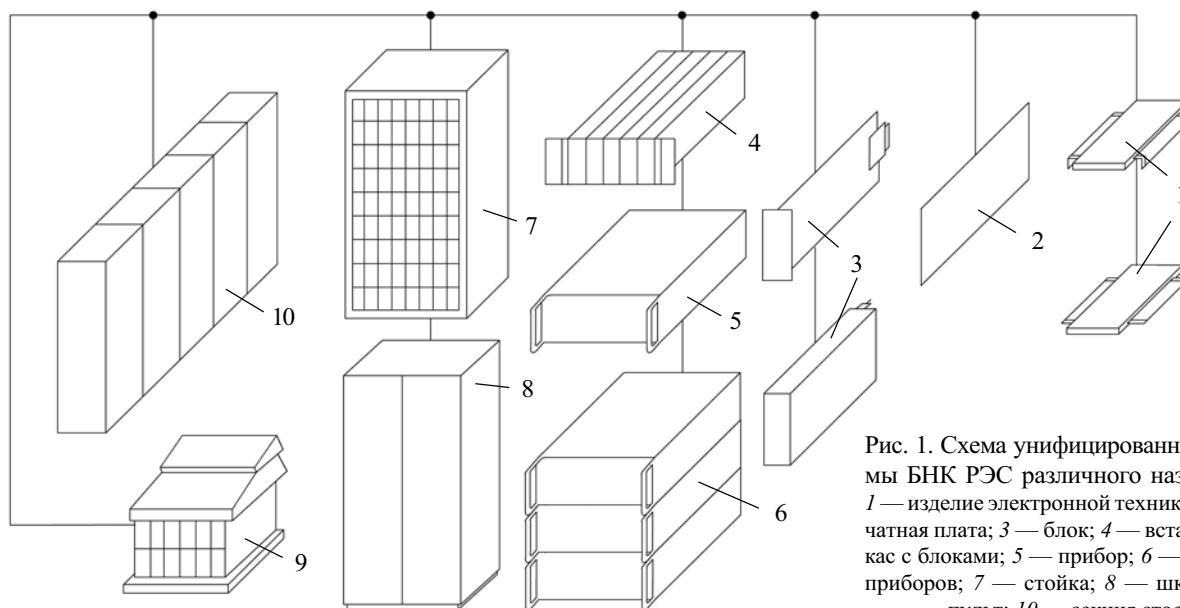


Рис. 1. Схема унифицированной системы БНК РЭС различного назначения: 1 — изделие электронной техники; 2 — печатная плата; 3 — блок; 4 — вставной каркас с блоками; 5 — прибор; 6 — комплект приборов; 7 — стойка; 8 — шкаф; 9 — пульт; 10 — секция стоек

В комплексных межотраслевых программах основное внимание и имеющиеся ресурсы направлены главным образом на создание унифицированной системы БНК для РЭС различного назначения (рис. 1). Предусмотрены также работы по созданию системы автоматизированного проектирования (САПР) БНК, которая должна обеспечивать требования качественного и надежного функционирования РЭС, устанавливаемых на различных эксплуатационных объектах [3, 6].

Следует отметить, что в разработанных программах практически не учтены актуальные и сложные задачи по промышленному освоению унифицированной системы БНК, которая, судя по мировому опыту развития производства систем БНК, будет серийно изготавливаться на различных предприятиях и, главным образом, на специализированных предприятиях, обеспечивающих централизованное производство и поставку конструктивных элементов и структурных конструктивных модулей БНК различных уровней иерархии, типоразмеров и условий эксплуатации.

Решение задач крупносерийного и централизованного производства деталей и сборочных единиц унифицированной системы БНК потребовало создания высокоэффективных автоматизированных систем управления (АСУ) различного производственного назначения (АСУТПП, АСУТП, АСУПП и многих других [7]).

Естественно, что рентабельные и радикальные решения вопросов разработки, производства и внедрения таких АСУ предполагают создание специально предназначенных для них РЭС, построение которых целесообразно реализовывать на основе структурных конструктивных модулей БНК необходимых типоразмеров, выбранных из всей совокупности типоразмеров унифицированной системы БНК. Однако не менее эффективным, если существует такая объективная возможность, является создание РЭС АСУ с использованием БНК, которые изготавливаются на предприятии, где планируется внедрение этих конкретных производственных АСУ. Здесь уместно подчеркнуть, что в зависимости от масштаба производства специализированных АСУ производственного назначения, их технико-экономической эффективности и многих других факторов не исключено, что наиболее целесообразной будет организация централизованных производств перспективных АСУ с их внедрением на предприятиях-изготовителях БНК.

Формированием и проведением единой научно-технической политики в области развития БНК и, соответственно, создаваемых на их основе РЭС АСУ занимается 48-й технический комитет (ТК—"Механические конструкции для электронного оборудования") Международной электротехнической комиссии (МЭК), в работах которого участвуют ведущие предприятия промышленности и Госстандарта РФ. В целях совершенствования и конкретизации этих работ решением Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации в 1999 году образован Межгосударственный технический комитет (МТК 20—"Базовые несущие конструкции, печатные платы, сборка и монтаж электронных модулей"), ведение секретариата которого возложено на ОАО "Авангард" (г. С.-Петербург).

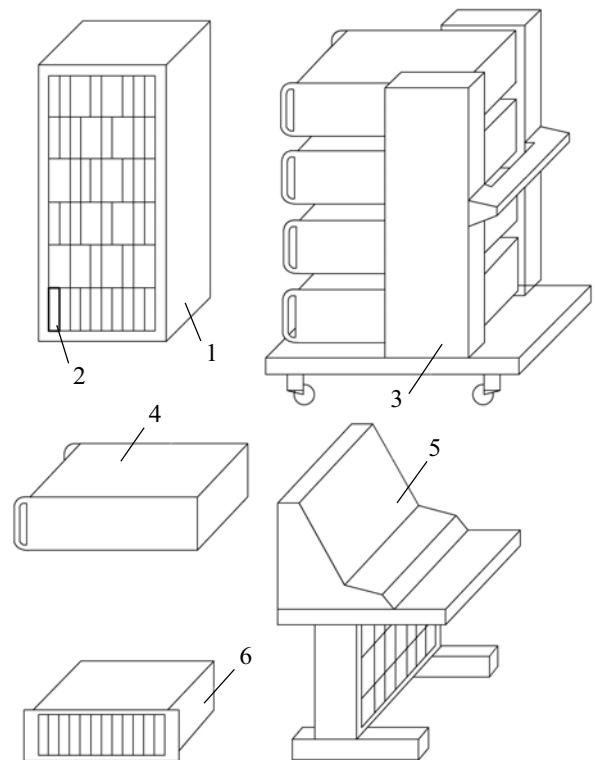


Рис. 2. Основные конструктивы системы БНК РЭС АСУ производственно-технологического назначения: 1 — стойка; 2 — блок; 3 — тележка с набором приборов; 4 — прибор; 5 — пульт; 6 — вставной каркас с блоками

В рамках актуальной и перспективной программы МТК 20, отвечающей потребностям многих отечественных и зарубежных предприятий, ведутся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию перспективных АСУ производственного назначения для серийного освоения конструктивных элементов и структурных конструктивных модулей (КМ) различного уровня иерархии унифицированной системы БНК РЭС. При этом используются результаты работы по математическому синтезу типоразмерных рядов системы БНК для РЭС АСУ технологическими процессами и производствами, изложенные в монографии [6].

На рис. 2 представлены основные варианты конструктивов системы БНК для построения АСУ различного производственно-технологического назначения, которые имеют наиболее широкое применение при создании перспективных производственных РЭС. На рис. 3 показаны основные конструктивные элементы и структурные КМ БНК стоечного исполнения, на базе которых разрабатывается необходимая и, как правило, достаточная номенклатура конструктивов вышеназванной системы БНК.

Структурные КМ различного уровня иерархии системы БНК производственных РЭС полностью соответствуют требованиям международных и государственных стандартов: МЭК 916, МЭК 917, МЭК 603-2, МЭК 603-9, DIN 41612, DIN 41642, ГОСТ Р 51623-2000, ГОСТ Р 50756.0-2000 и др.

Печатные платы (ПП) блоков (или БНК 1 РЭС в соответствии с принятой терминологией по [8, 9]) име-

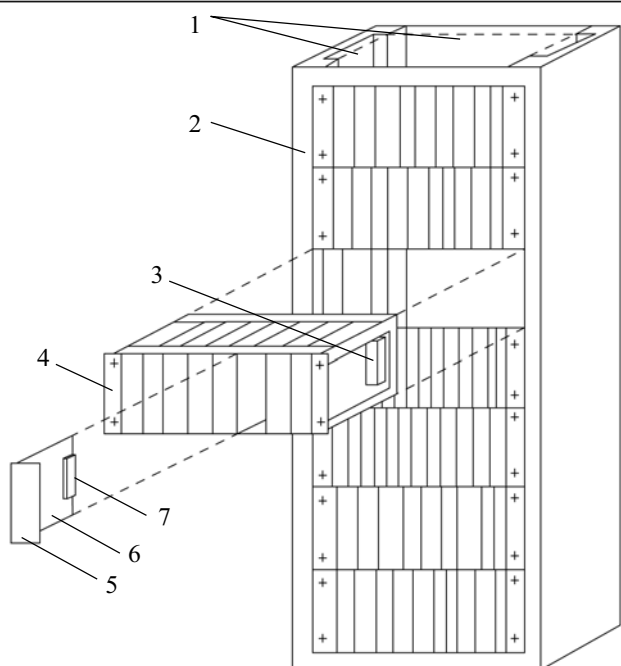


Рис. 3. Структурная схема построения стоечной БНК: 1 — кабельный канал; 2 — стойка; 3 — электросоединитель вставного каркаса; 4 — вставной каркас; 5 — блок; 6 — печатная плата (базовая); 7 — электросоединитель блока

ют девять типоразмеров: 115×160 (базовая ПП), 115×235, 115×285, 265×160, 265×235, 265×285, 415×160, 415×235, 415×285 мм.

Блоки БНК 1 разработаны с усиливающим обрамлением и без обрамления, с экранами (электростатическими и электромагнитными) и без экранов. Минимальный шаг установки (или минимальная ширина) блока составляет 15 мм, что соответствует лучшим мировым достижениям в разработке БНК [4—6].

Вставные каркасы (БНК 2) обеспечивают возможность применения различных видов и методов электромонтажа: кросс-плат, объемного и печатного; пайкой, накруткой, обжимкой и врезанием. БНК 2, в зависимости от размещаемых в них БНК 1, обладают следующими габаритными размерами: по ширине — 400 и 500 мм, по высоте — 150, 300 и 450 мм, по глубине — 175, 250 и 300 мм.

БНК 3 имеют экранированные и неэкранированные варианты исполнения (настольный прибор), обеспечивают построение РЭС с подводом внешних кабелей к их верхней и нижней частям (стойки), а также непосредственно к БНК 2. Стойки (шкафы-стойки с дверями) выполняются со следующими габаритными размерами: по ширине — 500 и 600 мм, по высоте 600—2000 мм с шагом приращения 200 мм и 2600 мм, по глубине — 300, 400, 500 и 600 мм.

БНК 1 и БНК 2 позволяют устанавливать электросоединители, соответствующие МЭК 603-2 и МЭК 603-9, с расстоянием между контактами 2,54 мм, а также электросоединители КЕО.264.043 и СНП-59-64В-23-1 с расстоянием между контактами 2,5 мм.

С целью повышения степени интеграции и быстродействия РЭС АСУ в БНК предусмотрена возможность применения системы электросоединителей по международному стандарту DIN 41642, что позволяет более чем в два раза увеличить число электрических соеди-

нений РЭС. Например, на ПП высотой 115 мм можно установить до 185 контактов вместо 96 контактов, на ПП высотой 265 мм — до 455 контактов вместо 192 контактов, на ПП высотой 415 мм — до 755 контактов. Допустимое недосочленение двух частей электросоединителей равно 2,5 мм, что превышает допустимое недосочленение вышеуказанных отечественных электросоединителей более чем в два раза, существенно снижая тем самым затраты на обеспечение механической прочности БНК 1 [2, 3].

С учетом внедрения САПР разработан также типовый ряд конструкций амортизирующих устройств, способов охлаждения и систем обеспечения теплового режима РЭС, создается система методов расчета и анализа электромонтажа и электромагнитной совместимости электронных модулей и РЭС как сложных технических объектов (см., например, [10—13]).

Важнейшим достоинством системы БНК РЭС АСУ является высокая технологичность за счет применения литых пластмассовых деталей, специально разработанных алюминиевых профилей (ОПр525, ОПр526, ОПр530, ОПр541, ПС885-1063, ПС 885-1064) и многих других конструктивно-технологических решений, предлагаемых для повышения технологичности БНК ведущими специалистами различных отраслей промышленности (см. [1—13]).

В заключение следует отметить, что внедрение рассмотренной системы БНК активно осуществляется несколькими ведущими предприятиями Российского агентства по системам управления, головным из которых является ОАО «Авангард».

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Лутченков Л. С. Оптимальное проектирование несущих конструкций как сложных систем.— Л.: Машиностроение, 1990.
2. Лутченков Л. С. Автоматизированное проектирование несущих конструкций радиоэлектронных средств.— М.: Радио и связь, 1991.
3. Кондрашов А. С. Модели и алгоритмы системного синтеза несущих конструкций радиоэлектронных средств.— СПб: Политехника, 1998.
4. Максимов А. В. Системный подход к проектированию базовых несущих конструкций радиоэлектронных средств.— СПб: СПб ГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 1999.
5. Голубев А. В. Параметрический синтез многоуровневых конструкций радиоэлектронных средств.— СПб: СПб ГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 1998.
6. Шерин К. Ю. Синтез типоразмерных рядов базовых несущих конструкций радиоэлектронных средств АСУ.— СПб: СПб ГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2000.
7. Гаскаров Д. В., Вихров Н. М. Управление и оптимизация научно-технических процессов.— СПб: Энергоатомиздат, 1995.
8. ГОСТ Р 52003—2003. Уровни разукрупнения радиоэлектронных средств. Термины и определения.
9. ГОСТ Р 51676—2000. Конструкции базовые несущие радиоэлектронных средств. Термины и определения.
10. Тартаковский А. М. Математическое моделирование в конструировании РЭС.— Пенза: Пенз. гос. техн. ун-т, 1995.
11. Лутченков Л. С., Лайне В. А. Моделирование и анализ тепловых режимов аппаратуры многоканальной связи.— СПб: СПб ГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 1995.
12. Шелест В. И., Кондрашов А. С. Алгоритмизация методов расчета электромагнитной совместимости функциональных узлов радиоэлектронных средств.— СПб: Лениздат, 1996.
13. Шелест В. И. Модели, алгоритмы и средства синтеза электромонтажа радиоэлектронных средств.— М.: Радио и связь, 1997.

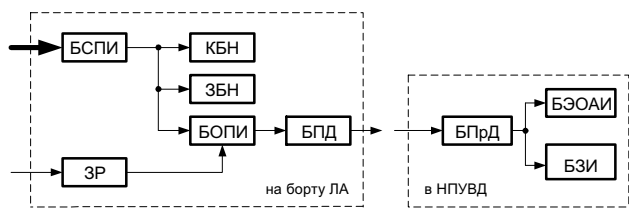


Рис. 2

контрольный бортовой накопитель информации (КБН), ЗБН и ЗР, предлагается подсистема резервирования полетной информации. Подсистема предполагает обеспечение безусловного наличия полетной информации на наземных пунктах управления воздушным движением (НПУВД) и включает в себя:

— на борту ЛА — блок обработки и подготовки информации (БОПИ), соединенный входами с выходами БСПИ и ЗР, и блок передачи данных (БПД), соединенный входом с выходом БОПИ;

— в НПУВД — блок приема данных (БПрД), соединенный по радиоканалу с БПД, блок записи данных (БЗИ) и блок экспресс-обработки и анализа информации (БЭОАИ) [4, 5], соединенные входами с выходами БПрД.

Функционально БОПИ объединяет (см. рис. 3) узлы 2 и 3 формирования границ диапазонов допуска (поля допуска) параметра (см. также рис. 4), узлы анализа 1 (см. также рис. 5) и узел 4 управления (см. также рис. 6), информационные входы 5, выходы 6 и 7 границ задания диапазонов допуска параметров, выходы 8 и 9 наличия численных значений информации, входы управления 10 группы элементов И узлов анализа, входы 11 разрешения анализа, выходы 12 поразрядного анализа узлов, входы 13 поразрядного

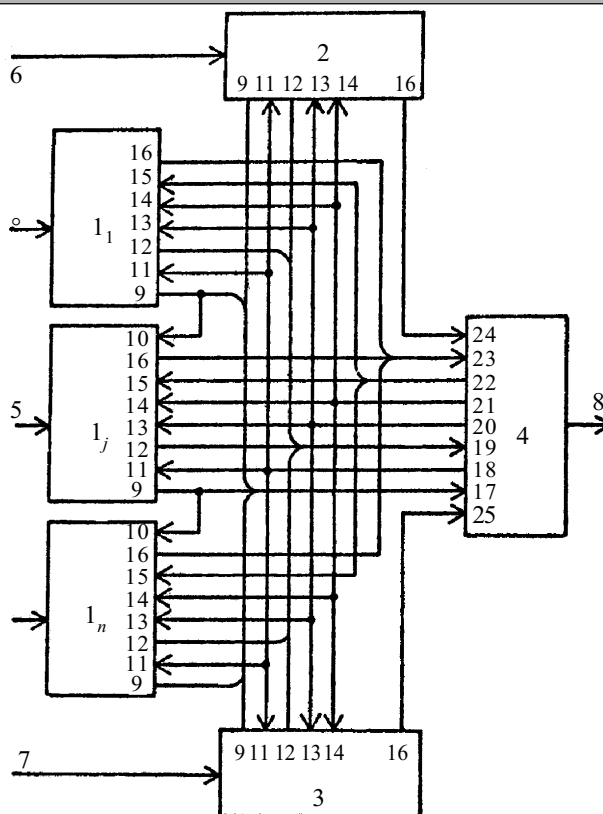


Рис. 3

анализа узлов, входы 14 опроса узлов, входы 15 сброса содержимого узлов анализа, выходы 16 ответа узлов, входы 17—20 узла управления, выходы 21 опроса, выходы 22 узла управления, входы 23—25

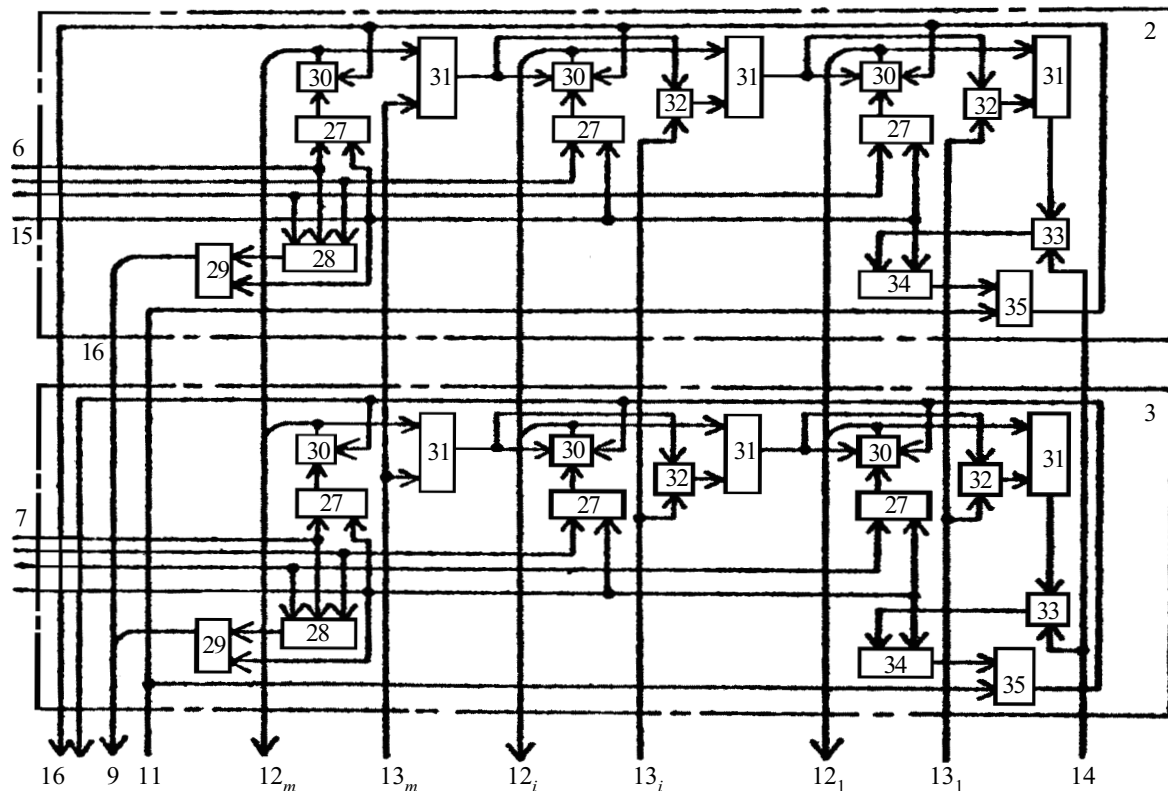


Рис. 4

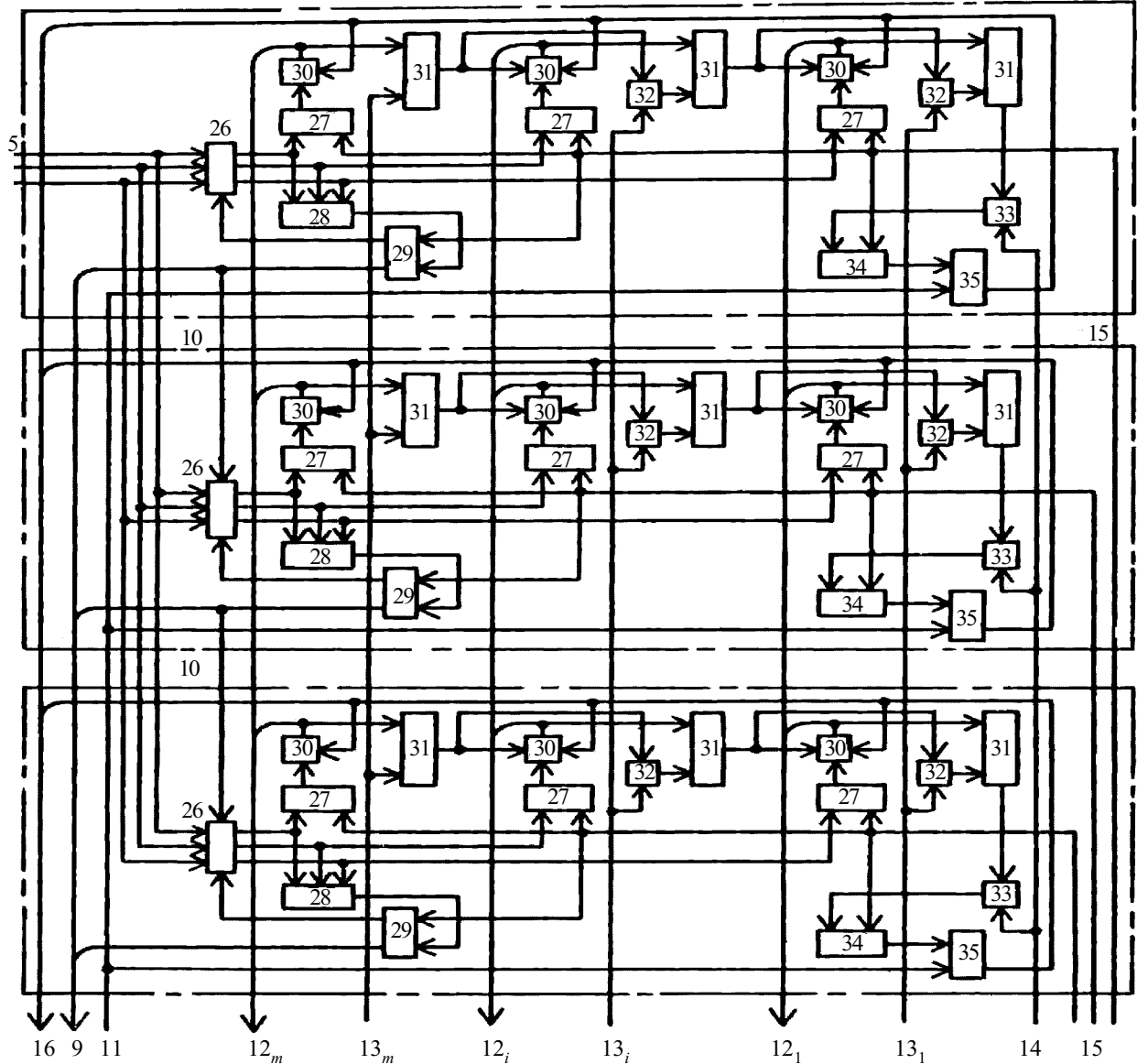


Рис. 5

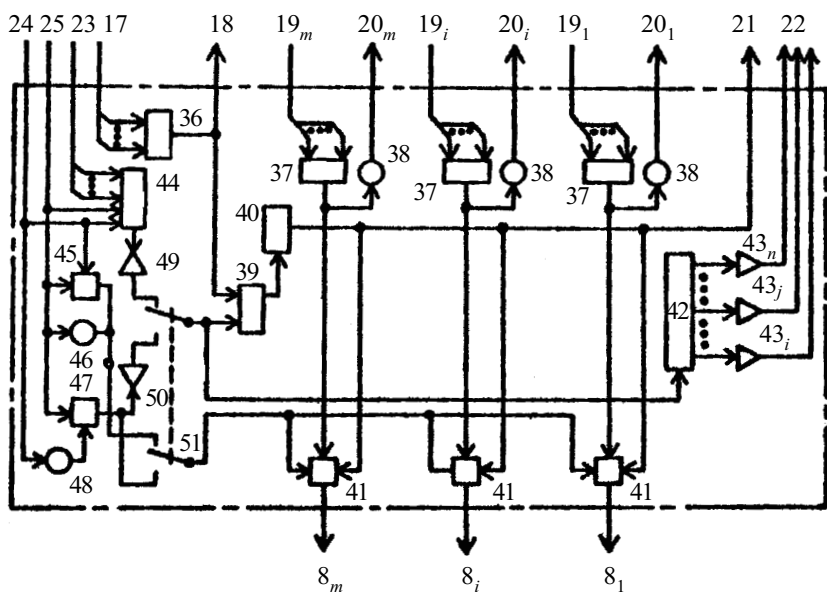


Рис. 6

узла управления, в узлах анализа и формирования границ поля допуска параметров группы элементов И 26, триггеры 27, 29 и 35, элементы ИЛИ 28, 31 и 34, элементы И 30, 32 и 33 [6].

Узел управления (см. рис. 6) содержит многоходовые элементы И 36 и ИЛИ 37 и 44, группу элементов НЕ 38, 46 и 48, триггер 39, генератор импульсов 40, элементы И 41, 45 и 47, регистр сдвига 42, группу формирователей импульсов 43, 49 и 50 и коммутатор 51.

БОПИ обеспечивает вывод ранжированного ряда значений полетной информации (т. е. в порядке ее приоритетности по значимости), причем закон упорядочения определяется как абсолютными значения-

ТЕХНИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА

ми информационных сообщений, так и наложением ограничений по уставкам на поля допуска или разрешения выборки, что, в конечном итоге, обеспечивает ускоренный анализ при разборе полета.

При этом блок передачи данных (БПД) передает информацию на наземное приемное устройство (БПрД), устанавливаемое в НПУВД, где и осуществляется запись, хранение и экспресс-анализ информации, по результатам которого на НПУВД имеется возможность в любой момент времени и независимо от наличия и состояния бортовых самописцев ЛА оценить полетную ситуацию и оперативно принять соответствующие меры по обеспечению штатной ситуации и/или минимизации нежелательных последствий отклонения от нее.

Предлагаемая система сбора и обработки полетной информации полностью автономна, совместима с любой системой сбора информации, и в принципе позволяет, не прибегая к информации с бортовых са-

мописцев, проводить анализ технического состояния ЛА и полетной ситуации в предполетное, полетное и в постполетное время. Система может способствовать сокращению нештатных ситуаций на летательных аппаратах и безаварийности на авиалиниях.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Лившиц Г. И. Оранжевый и «черный ящик» / Наука и жизнь.— 1993.— № 1.— С. 16—20.
2. Шибанов Г. П. Распознавание в системах автоконтроля.— М.: Машиностроение, 1973.
3. Пат. 911539 SU. Многоканальное устройство для контроля параметров / М. Д. Скубилин, В. А. Карачевцев, А. П. Самойленко.— 1982.— Бюл. № 9.
4. Биргер И. А. Техническая диагностика.— М.: Машиностроение, 1978.
5. Пат. 1478226 SU. Экспресс-анализатор / М. Д. Скубилин.— 1989.— Бюл. № 17.
6. Пат. 1242932 SU. Устройство для сортировки информации / М. Д. Скубилин, В. В. Бирко.— 1986.— Бюл. № 25.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

ChipEXPO

ОКТАБРЬ 18-20
-2005

3-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА
РОССИЯ • МОСКВА • ЭКСПОЦЕНТР

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:



Министерство промышленности и энергетики Российской Федерации
Министерство экономического развития и торговли Российской Федерации
Федеральное агентство по промышленности
Департамент науки и промышленной политики города Москвы
Московская торгово-промышленная палата



ИНФОРМАЦИОННАЯ
ПОДДЕРЖКА



КОМПОНЕНТЫ
И ТЕХНОЛОГИИ



ОРГАНИЗАТОР ВЫСТАВКИ

ЗАО «ЧипЭкспо», Россия,
111141, Москва, ул. Перовская 19/2, стр. 3,
тел./факс: (095) 368-1039, e-mail: info@chipexpo.ru

www.chipexpo.ru

Д. т. н. В. Ш. БЕРИКАШВИЛИ, Н. Т. КЛЮЧНИК,
К. Н. КОСТЕНКО, к. т. н. М. Я. ЯКОВЛЕВ

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

Дата поступления в редакцию
01.02 2005 г.

Оппонент д. т. н. В. И. ОСИНСКИЙ
(Центр оптоэлектронных технологий, г. Киев)

ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДНЫЕ ДИСПЕРСИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ВОЛС

Показана возможность многократного увеличения пропускной способности волоконно-оптических систем передачи информации. Рассмотрены особенности технологии получения дисперсионных элементов.

Терабитные системы связи на основе спектрального уплотнения

Известно, что за первые 90 лет развития техники связи скорость передачи информации возросла на пять порядков, начиная от первых телефонных линий связи, которые имели скорость передачи информации порядка 1 бит/с. Примерно на те же пять порядков возросла скорость передачи информации систем связи за последние 20 лет, достигнув примерно 2 Тбит/с ($2 \cdot 10^{12}$ бит/с) [1].

Резкое увеличение скорости передачи информации произошло благодаря использованию новой технологии спектрального мультиплексирования. Применение этой технологии не требует трудоемкой и дорогостоящей замены уже проложенного оптического кабеля. Даже если в будущем стоимость волокна уменьшится за счет использования новых технологий, волоконно-оптическая инфраструктура (проложенное волокно и установленное оборудование) всегда будет стоить достаточно дорого.

Технология спектрального уплотнения с разделением по длинам волн (WDM — Wavelength Division Multiplexing) является основополагающей для использования обширной полосы пропускания оптического волокна. Применение данной технологии позволяет одновременно на разных длинах волн передавать по одному волокну самые разные информационные потоки (аналоговые, ВЧ, СВЧ и цифровые). Одновременно с развитием технологии спектрального уплотнения решалась задача увеличения дальности передаваемой информации — как за счет снижения потерь в волокне, так и путем использования усилителей-ретрансляторов. Усовершенствование существующих электронно-оптических усилителей прекратилось после создания квантовых оптических усилителей на основе активного оптического волокна, легированного эрбием с накачкой излучения полупроводниковым лазером [2]. Появление таких усилителей с брэгговскими решетками позволило сделать их широкополосными и усиливать сигнал во всем диапа-

зоне длин волн, на которых работают устройства спектрального уплотнения [3].

В периодической литературе предлагаются различные конструкции терабитных систем связи на основе спектрального уплотнения каналов [4]. Для локальных, корпоративных и внутриобъектовых сетей вполне достаточно грубого спектрального уплотнения до 10—16 уплотняемых каналов (Coarse WDM или CWDM). Однако там, где есть большие информационные потоки, целесообразно использовать большее количество каналов в «окне» минимальных потерь оптических волокон в диапазоне длин волн от 1,45 до 1,6 мкм. В настоящее время системы с частотным интервалом между каналами 100 ГГц ($\approx 0,8$ нм) и меньше называют системами плотного спектрального мультиплексирования (DWDM — Dense WDM). Именно такие системы используются для магистральной передачи информации (для межконтинентальных и межрегиональных линий связи), а также в системах с большими информационными потоками. Целесообразно использовать для вышеупомянутых целей и сверхплотное спектральное уплотнение (UDWDM — Ultra Dense WDM) с шагом деления 0,1—0,2 нм.

Сейчас технология спектрального мультиплексирования применяется в основном на линиях связи большой протяженности, где требуется большая полоса пропускания. Вместе с тем широким потенциальным рынком для применения технологии спектрального мультиплексирования являются также сети городского и регионального масштаба и системы кабельного телевидения. Эта технология перспективна для прокладки оптических кабелей в каждый дом для создания качественных информационных каналов связи широкого назначения (ТВ, интернет, видеотелефон и т. д.).

Необходимость эффективно использовать проложенный кабель привела к значительному увеличению числа каналов, передаваемых по одному волокну, и уменьшению спектральных интервалов между ними. Однако при сближении каналов, особенно в протяженных DWDM-системах связи, начинают проявляться линейные и нелинейные перекрестные помехи между каналами, что в конечном счете приводит к снижению соотношения сигнал/шум и качества связи.

Обобщенная структура многоканальной системы передачи информации со спектральным уплотнением представлена на **рис. 1**. Система включает следую-

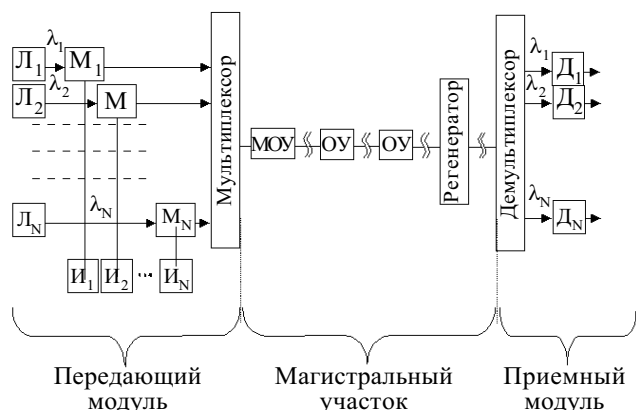


Рис. 1. Блок-схема многоканальной системы передачи со спектральным уплотнением (WDM)

щие составные элементы (см. обозначения на рисунке): Л — лазеры, И — источники потока данных (информации), М — модуляторы, МОУ — мощный оптический усилитель (бустер), ОУ — квантовый оптический усилитель, Д — фотодетекторы. Наиболее важными элементами системы являются мультиплексор и демультимплексор.

Каждый сигнал от источника информации и сигнал от соответствующего лазера с длинами волн $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ поступают в модулятор, где происходит модуляция сигнала. Далее промодулированные сигналы попадают в мультиплексор, где происходит спектральное уплотнение сигналов. На выходе мультиплексора мы имеем уплотненные сигналы, готовые для передачи на необходимое расстояние.

Как известно, оптоволокно имеет известный коэффициент затухания, поэтому через определенное расстояние необходимо ставить усилители сигналов. Но усилитель не восстанавливает форму сигнала. Поэтому при передаче сигнала на расстояния более 1000 километров необходимо ставить регенератор для восстановления формы сигнала. На другом конце линии оптический демультимплексор осуществляет разделение переданных сигналов по соответствующим приемникам или канальным волноводам. Желательно, чтобы все элементы схемы были обратимыми.

Дисперсионные элементы, предназначенные для систем CWDM

Объемные дисперсионные элементы давно используются в оптике, в спектральном анализе, и реализованы в монохроматорах, спектроанализаторах, спектрографах.

Имеется три основных типа объемных дисперсионных элементов, позволяющие разделять спектрально уплотненные каналы: призма, дифракционная решетка проходящего типа, дифракционная решетка отражательного типа. Конструкция таких устройств представлена на рис. 2, где они показаны в качестве элементов в многомодовых волоконно-оптических системах спектрального уплотнения.

Устройства работают следующим образом. По оптическому волокну 1 распространяется излучение на нескольких длинах волн. На выходе волокна 1 установлен коллимирующий объектив 2, пройдя который, пучок света становится параллельным и подается на дисперсионный элемент — призму 3 (рис. 2, а), ди-

фракционную решетку проходящего типа 7 (рис. 2, б) или на отражательную дифракционную решетку 8 (рис. 2, в). На выходе дисперсионного элемента (призма или решетка) ставится выходная фокусирующая система 4, с помощью которой угловое разделение длин волн (каналов) преобразуется в сфокусированное пространственное разделение каналов по элементам линейки фотодетекторов или по торцам набора оптических волокон. Вогнутая отражательная дифракционная решетка (рис. 2, в) не требует фокусирующего объектива.

Основной особенностью дисперсионных элементов является разложение смешанного спектра на составляющие по длинам волн (частотам). В частности, в призме и дифракционной решетке проходящего типа осуществляется разделение спектральных составляющих по углам (по направлениям). Фактически угловое распределение является двумерным преобразованием Фурье.

Использование линз или объективов позволяет осуществлять пространственное преобразование и, одновременно, фокусировку отдельных длин волн.

Подобные объемные дисперсионные устройства оказались эффективными для использования в системах разреженного спектрального уплотнения (CWDM). Причем данные системы спектрального уплотнения могут использоваться в системах связи

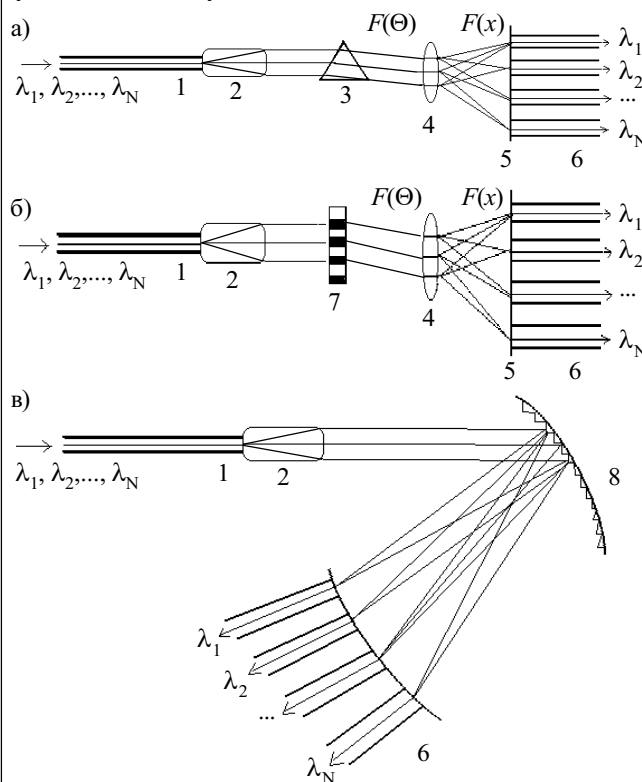


Рис. 2. Схемы основных типов объемных демультимплексоров на основе призмы (а), дифракционной решетки проходящего типа (б), на основе отражательной дифракционной решетки (в):

1, 6 — оптическое волокно; 2 — коллимирующий микрообъектив; 3 — объемная призма; 4 — фокусирующая система на выходе; 5 — каналные волноводы (линейка фотодетекторов); 7 — объемная дифракционная решетка проходящего типа; 8 — объемная дифракционная решетка отражательного типа

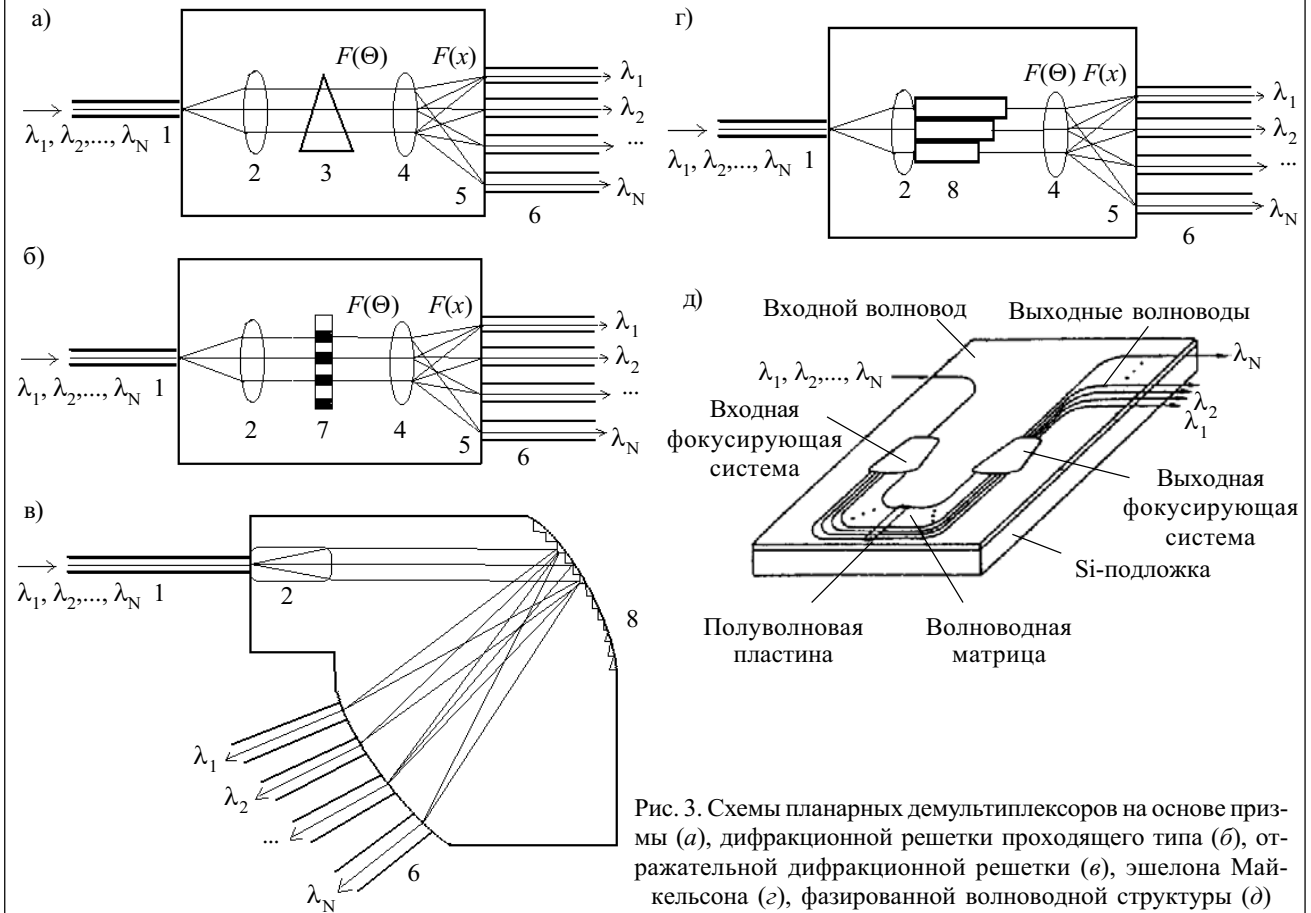


Рис. 3. Схемы планарных демультиплексоров на основе призмы (а), дифракционной решетки проходящего типа (б), отражательной дифракционной решетки (в), эшелона Майкельсона (г), фазированной волноводной структуры (д)

на основе многомодовых волокон, более дешевых и простых в использовании, что особенно удобно при реализации идеи «волокно в каждый дом».

Аналогом объемных дисперсионных элементов является их *планарная реализация в виде плоских волноводных слоев структур*. Причем для случая использования одномодовых спектральных оптических волокон планарная реализация является единственно возможным средством достижения высокой степени уплотнения/разуплотнения каналов. На **рис. 3** представлены наиболее перспективные схемы интегрально-оптических дисперсионных элементов.

Принцип работы планарных (интегрально-оптических) демультиплексоров рассмотрим на примере рис. 3, а. По одномодовому волокну 1 распространяется свет с информационными каналами на различных длинах волн. Диаметр волокна составляет 8—9 мкм, и толщина волноводного слоя должна быть такой же. Введенное в плоский волновод излучение расходится. На пути расходящегося пучка помещается планарный коллимирующий элемент 2 (геодезическая линза, выполненная дополнительным легированием в волноводе), причем расстояние между торцом волокна и центром линзы равно ее фокусному расстоянию. В результате этого после линзы пучок становится коллимированным, а его ширина должна быть равной апертуре дисперсионного элемента демультиплексора. Дисперсионный элемент 3 — призма, равно как и линза, выполняется дополнительным легированием волноводного слоя. Пройдя дисперсионный элемент, оптический сигнал разделяется на N

каналов, каждый из которых на выходе дисперсионного элемента имеет свое фазовое распределение и распространяется под определенным углом к выходной апертуре.

Отметим, что эта и другие конструкции дисперсионных элементов — дифракционная решетка (рис. 3, б), отражательная дифракционная решетка (рис. 3, в), эшелон Майкельсона (рис. 3, г) и волноводная дифракционная решетка (рис. 3, д) — осуществляют угловое разделение каналов и являются наиболее перспективными с точки зрения обеспечения максимального числа каналов.

За выходной апертурой дисперсионного элемента располагается фокусирующий элемент 4 (геодезическая линза), который обеспечивает попадание каждого из N каналов на соответствующий элемент линейки фотодетекторов или один из канальных волноводов 5 или 6.

Фотодетекторы или канальные волноводы должны находиться в фокальной плоскости линзы. При этом условии поперечный размер области, занятой оптическим сигналом одного канала, будет минимальным. Ширина фотодетекторов и расстояние между ними определяются параметрами дисперсионного элемента, выходной линзой и допустимым уровнем перекрестных помех в каналах.

Следует особо подчеркнуть, что интегрально-оптические технологии обеспечивают не только существенное улучшение характеристик указанных устройств, но и позволяют создавать структуры, реализация которых на принципах объемной оптики невозможна. Кро-

ме того, принципы интегральной оптики позволяют объединить на единой подложке все элементы передающего модуля (лазеры, модуляторы, мультиплексоры, оптические усилители), т. е. создавать единую интегрально-оптическую схему передающего, а также приемного модулей. Поэтому устройства, построенные на принципах интегральной оптики, считаются наиболее перспективными устройствами для высокоскоростных многоканальных систем оптической связи со спектральным уплотнением.

Отдельные элементы — призмы, линзы, дифракционные решетки и каналные волноводы с разной фазовой задержкой — создаются путем дополнительного легирования или путем изменения геометрии канального волновода.

По результатам обзора различных схем дисперсионных элементов можно сделать следующие выводы.

1. Наиболее эффективной для мультиплексоров с высокой степенью уплотнения каналов оказалась волноводная структура, представленная на рис. 3, д, соответствующая видоизмененному эшелону Майкельсона (рис. 3, з).

2. На таких структурах получены мультиплексоры с разделением на 16, 32, 64, 128 и более каналов.

3. Получено разделение каналов по длинам волн с интервалом 0,5 и 0,2 нм, соответствующее частотному спектральному разделению на 100 и 50 ГГц.

4. Развязка соседних каналов составляет не менее 25 дБ.

Технология изготовления планарных интегрально-оптических дисперсионных элементов

Отправной точкой при изготовлении канальных волноводов многих типов является подложка, на которой образован плоский волновод, реализованный с помощью какой-либо технологии. В этом случае на поверхности пластины можно одновременно задать поперечные размеры ряда канальных волноводов, используя обычную фотолитографическую технику, подобную той, которая используется в технологии изготовления электрических схем.

Существует множество различных типов планарных оптических волноводов, отличающихся способом формирования волноводной структуры: а) гребенчатые волноводы, получаемые с помощью травления; б) гребенчатые волноводы с наложенной полосткой; в) каналные волноводы, получаемые методом имплантации или диффузии; г) каналные волноводы, получаемые методом ионного обмена. Например, гребенчатые волноводы, получаемые с помощью травления, из-за шероховатых краев имеют достаточно большие потери. Однако именно данный тип волноводов позволяет реализовать на практике большую материальную и волноводную дисперсию и разность фазовой задержки $\Delta\gamma$. Канальные волноводы, получаемые методом ионного обмена, имеют малые потери (порядка 0,1 дБ/см), но обеспечивают малую разность фазовой задержки $\Delta\gamma$ (порядка 0,1), что в итоге приводит к небольшому числу спектрально разрешаемых каналов.

Особенностью создания таких структур является то, что они создаются по технологии, близкой к мик-

роэлектронике, на кварцевых или кремниевых подложках.

Обычный метод изготовления гребенчатых волноводов состоит в нанесении фоторезиста на подложку с уже имеющимся в ней плоским волноводным слоем, облучении фоторезиста ультрафиолетовым или рентгеновским излучением через контактно наложенную маску (которая и определяет форму волновода) и проявлении фоторезиста. После выполнения всех вышеперечисленных операций на поверхности фоторезиста остается картина требуемой структуры (см. рис. 4).

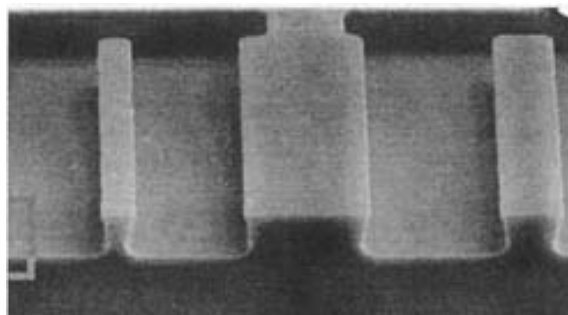


Рис. 4. Фрагмент волноводной структуры на основе гребенчатых волноводов

При создании гребенчатого волновода используется полированная подложка из кремния с окисленным поверхностным слоем SiO_2 , на котором плазмохимическим методом наносится SiO_2 , легированный GeO_2 , или P_2O_5 , или Pb_2O_3 . Легированный слой является волноводным слоем с повышенным показателем преломления. После этого наносится тонкий слой SiO_2 .

Фоторезист используется в качестве маски как в случае обычного химического травления, так и при травлении с помощью ионного пучка. При нанесении фоторезиста на подложку необходимо добиться однородности наносимой пленки. В зависимости от технологических задач можно получить пленку методом центрифугирования (порядка 0,25 мкм) или методом вытягивания из раствора (расплава). В последнем случае пленка получается с большей толщиной (порядка 1 мкм). Чем меньшей будет скорость вытягивания из раствора, тем тоньше и однороднее получится наносимая пленка.

Для получения структур гребенчатых волноводов можно использовать и влажное химическое травление в сочетании с фоторезистивным маскированием. Такое травление не приводит к образованию радиационных эффектов, как в случае ионного травления, однако при его использовании очень трудно получить структуры с заданной глубиной и формой профиля с прямоугольными стенками.

Как один из вариантов, подобные гребенчатые волноводы можно получать напыляя слой металла на подложку, которая не содержит в себе плоского волноводного слоя. В дальнейшем, после нанесения фоторезиста и его засветки через маску, происходит частичное травления металла в незащищенной фоторезистом области. Далее производится ионно-плазменное травление поверхности во фторсодержащей атмосфере. В результате после завершения процесса травления на фоне напыленной пленки получаются участки гребенчатых волноводов.

В наших экспериментах [5] планарные волноводные структуры создавали методом плазмохимического осаждения слоев кварцевого стекла, легированного фтором, на кварцевую подложку с последующим нанесением слоев синтетического кварцевого стекла и фторированного защитного слоя. Изображение такого волноводного слоя приведено на **рис. 5**. Последующее применение фотолитографии и ионно-плазменного травления позволяло получать требуемые планарные структуры гребенчатых волноводов с затуханием менее 0,5 дБ/см.

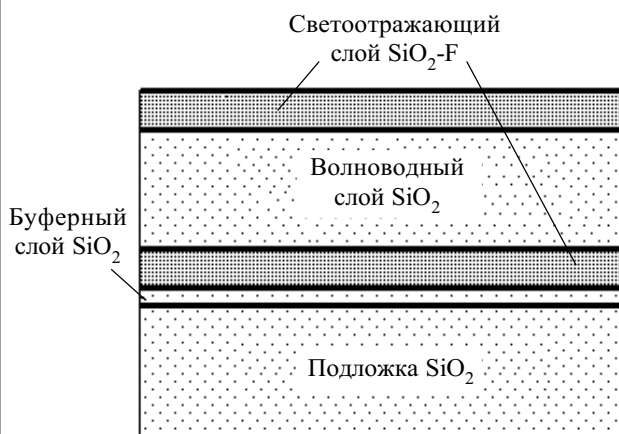


Рис. 5. Поперечное сечение волноводной структуры на основе SiO₂

Гребенчатые волноводы могут изготавливаться методом наложения полоски с волноведущим слоем. Вместо формирования кварцевого волноводного слоя можно использовать наложенную полоску из органического диэлектрика, которая наносится на верхнюю поверхность. Форму полоски можно получить с помощью того же фотолитографического процесса, который применялся для получения канальных волноводов, рассмотренных выше. Волноводы подобного типа можно также изготавливать используя маскирование фоторезистом, а также с помощью ионно-лучевого или плазмохимического травления.

Не все методы изготовления канальных волноводов основаны на начальном использовании волноводов с плоской структурой. Существуют методы, основанные на *использовании либо диффузии, либо ионной имплантации соответствующих легирующих атомов непосредственно в подложку, но через маску*. Такие волноводы часто называют погруженными канальными волноводами, т. к. они находятся под поверхностью. В данном случае маскирование с помощью фоторезиста не является эффективным, т. к. последний не выдерживает воздействия высоких температур, необходимого для проведения диффузии, и не обладает достаточной молекулярной массой для экранирования подложки от попадающих на нее высокоэнергетических ионов. Здесь обычно в качестве маскирующих материалов используются пленки оксидов SiO₂ или Al₂O₃, однако для формирования рисунка на маскирующем слое оксида или металла используют фоторезист.

При изготовлении волноводов непосредственно диффузией атомов в подложку крайне важно опти-

ческое качество материала подложки. Он должен обладать малыми оптическими потерями, а также иметь гладкую полированную поверхность для предупреждения рассеяния. Одним из самых значительных преимуществ метода является планарность процесса — поверхность подложки не нарушается выступами или впадинами, что упрощает процесс оптического согласования при вводе и выводе излучения, а проблемы, связанные с загрязнением поверхности пылью или влагой, сводятся к минимуму.

Перед тем, как приступить к изготовлению волноводной структуры, необходимо убедиться в том, что полосковые волноводы, получаемые методом твердотельной диффузии, являются одномодовыми на заданной длине волны и обеспечивают такое поперечное распределение интенсивности света, которое приводило бы к максимальному коэффициенту связи с одномодовым волоконным световодом.

В качестве материала для изготовления канальных волноводов методом диффузии можно использовать ниобат лития. Рассчитать заранее процесс диффузии титана в анизотропный кристалл ниобата лития довольно трудно, поскольку он, кроме всего прочего, зависит и от состава атмосферы, в которой проводится диффузия, и от параметров технологического оборудования. Проще провести экспериментальную «калибровку» этого процесса на реальном технологическом оборудовании. Для этого необходимо нанести на тестовую подложку, например ниобата лития, несколько различных по ширине полосок титана и провести диффузию в конкретных технологических условиях.

Для проведения указанной «калибровки» разработан специальный фотосаблон, позволяющий на одной подложке сформировать несколько различных по ширине полосковых волноводов. Для установления необходимых параметров полоскового волновода шаг по ширине на фотосаблоне выбран равным одному микрометру, что позволяет, используя при необходимости интерполяцию, выбрать ширину волновода с точностью 0,5 мкм. Вторым параметром, которым является распределение интенсивности света по глубине волновода, можно управлять изменением толщины напыляемой пленки титана.

Затем на подложку поверх пленки фоторезиста наносится сплошная пленка титана толщиной порядка 70—80 нм. Нанесение пленки титана осуществляется методом вакуумного термического испарения титана. В нашем случае для этого использовалась промышленная вакуумная установка PP600, в которой паромасляный насос был заменен турбомолекулярным. Это позволило избавиться от остаточного давления паров масла в вакууме.

Для нагрева и испарения титана использовался испаритель, состоящий из 3—4 проволочек вольфрама диаметром 0,5 мм, скрученных между собой. На этот нагреватель плотно навивалась полоска титана сечением 0,6×2 мм длиной около 50 мм. При пропускании через такой нагреватель тока силой 3—5 А происходило нагревание и испарение титана. Подложка была расположена на расстоянии примерно 0,5 м от нагревателя. Рядом с подложкой помещалась стеклянная пластина, через которую проходил луч гелий-неонового лазера, расположенного вне вакуумного объема. Прошедший через стеклянную пластину лазерный луч выводился из вакуумного объема и попадал на фотоприемник, позволяющий измерять его интенсивность. При росте толщины пленки титана интенсивность прошедшего света уменьшалась, что позволяло остановить процесс напыления при достижении нужной толщины.

После напыления пленки титана заданной толщины подложку следует поместить в органический растворитель (например ацетон), где фоторезист быстро растворяется, а расположенная поверх него пленка титана оказывается свободно плавающей в растворителе. В результате на подложке остается система из узких полосок титана, в точности повторяющая рисунок волноводной системы.

Далее необходимо провести диффузию титана внутрь подложки из ниобата лития с целью формирования непосредственно волноводной структуры. Процесс диффузии протекает при температуре 980°C в течение 4—6 ч. Подложку (рабочей поверхностью вниз) помещают в негерметичный контейнер из палладиевой фольги толщиной 0,2 мм и всё вместе размещают в кварцевой пробирке, на дне которой находится гидроокись лития в количестве 2—3 г.

Дело в том, что при нагревании ниобата лития до температур порядка 900—1000°C происходит потеря им окиси лития, что в свою очередь повышает показатель преломления в приповерхностном слое кристалла, и тем самым формируется нежелательный планарный оптический волновод. Для предотвращения этого процесса и используется гидроокись лития, которая при таких температурах уже разлагается на окись лития и воду. Тем самым создается избыточное давление паров окиси лития в кварцевой пробирке, что препятствует протеканию обратной диффузии окиси лития из ниобата лития.

Следует заметить, что при столь высоких температурах ниобат лития вступает в химические реакции с кварцем. Избежать этого можно, если не допускать непосредственного контакта подложки с кварцем, что легко достигается путем изоляции кристаллической подложки в палладиевом контейнере.

Остается отметить, что процесс диффузии проводится в атмосфере воздуха. Температурные режимы, а именно — скорость нарастания температуры, точность поддержания температуры диффузии и скорость остывания, определяются типом используемой муфельной печи (в нашем случае это печь типа СУОЛ—0.44/12-М2-У4.2).

После завершения процесса диффузии и полного остывания печи с подложкой (по времени это занимает примерно 14—16 ч) следует провести дополнительный осмотр волноводной системы под микроскопом на предмет обнаружения каких-либо повреждений, вызванных высокотемпературным воздействием на кристалл ниобата лития.

Кварцевую пробирку и палладиевый контейнер можно использовать повторно, гидроокись лития следует обновлять.

К достоинствам этого процесса можно отнести то, что он не столь сложен по сравнению с процессами, которые были описаны ранее, т. к. нет необходимости в изготовлении плоской волноводной структуры по всей поверхности чипа перед формированием полосковых волноводов.

Суть метода ионного обмена в создании оптических волноводов состоит в том, что при контакте поверхности натриевого стекла с расплавом солей типа AgNO_3 , KNO_3 и им подобных ионы серебра и калия замещают ионы натрия, находящиеся в стекле. При этом показатель преломления в приповерхностной области стекла возрастает. Волноводы, полученные в стекле при использовании ионов калия, имеют малые потери (порядка 3 дБ/см) [6], хорошо стыкуются с одномодовым волокном. Кроме того, при оп-

ределенных технологических режимах можно добиться равенства скоростей распространения низших волн разной поляризации. Это очень важно при использовании одномодовых волокон с круглой сердцевинной.

Подложка с металлической титановой маской, обращенной вниз, помещается на стеклянные прокладки толщиной 3—4 мм и пружинным рычагом прижимается к ним. Ванна помещается в печь марки СНОЛ 1.6.2.51/9-ИЗ, задается рабочая температура в камере (355°C). Через 20 мин после достижения этой температуры ванна устанавливается в положение, в котором происходит процесс ионного обмена, который продолжается 10,5 ч. По истечении этого времени ванна возвращается в исходное положение, и печь выключается. Ванна с образцом может быть извлечена из печи не ранее чем спустя 15 ч после ее выключения.

Остатки соли KNO_3 на поверхности подложки удаляются сначала в сосуде с дистиллированной водой (4—5 мин), а затем в проточной дистиллированной воде в течение 2—3 мин. После этого осуществляется сушка в потоке очищенного и горячего воздуха.

Удаление маски из Ti проводится в сосуде с травителем. Состав травителя: HNO_3 (20 мл) + H_2O (30 мл) + NH_4F (5 мл). Травитель нагревают до 50°C, затем в него опускают образец. Процесс удаления титановой маски проходит за 1—2 мин при помешивании травителя.

Как и в случае канальных волноводов, получаемых методом имплантации или диффузии, метод ионного обмена имеет те же достоинства — планарный характер волноводов и простота технологического процесса. Помимо всего, к достоинствам ионно-обменных волноводов можно отнести их относительно невысокий уровень потерь. Однако существенным недостатком таких систем является малая разность фазовых замедлений $\Delta\gamma$ (порядка 0,1), что, в конечном счете, не приводит к большому числу спектрально разрешаемых каналов.

Перспективы развития многоканальных систем связи

Несмотря на то, что солитонные системы связи пока еще не стали коммерчески доступными, многое говорит о быстром развитии солитонной передачи [7]. В солитонных системах не нужны повторители и оптические усилители, а потому появление таких систем в сочетании с использованием технологии DWDM значительно уменьшит затраты на передачу информации. Объем публикаций и исследований, выполняемых университетскими и промышленными научными центрами, служит несомненным показателем огромного интереса к этой области и позволяет надеяться, что через некоторое время солитонные системы связи станут коммерчески доступными.

Важным направлением в области создания систем со спектральным уплотнением каналов является разработка лазеров с фемтосекундной длительностью импульсов и высокой частотой их следования. Такие лазеры создают спектральный и временной суперконтинуум, из которого с помощью демультимплексоров и модуляторов формируются многоканальные потоки информационных импульсов с разделением по длинам волн.

На пороге широкого применения стоит технология «волоконно до дома». Единственное препятствие, из-за которого эта технология пока коммерчески невыгодна, это высокая цена трансивера, который необходимо устанавливать в каждом доме. Возможно, использование беспроводной передачи на конечном отрезке линии связи [8] позволит обеспечить приемлемые скорости передачи, без необходимости широкого развертывания совершенно новой волоконно-оптической инфраструктуры.

Еще одна многообещающая технология для локальных и других линий связи небольшой протяженности — использование WDM-мультиплексирования по многомодовому волокну. При совмещении с технологией «волоконно до дома» она, возможно, обеспечивает меньшую стоимость и большую надежность.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Дианов Е. М. На пороге Тера-эры // Квантовая электроника.— 2000.— Т. 30, № 8.— С. 659—662.

2. Taga H. Long distance transmission experiments using the WDM technology // Journal of Lightwave Technology.— 1996.— Vol. 14.— P. 1287—1297.

3. Потапов В. Т. Optical Fiber Communication 2003 // Фотон-Экспресс.— 2003.— № 4.— С. 3.

4. Takashina K., Shibano E., Taga H., Goto K. 1 Tbit/s WDM repeaterless transmission over 200 km with Raman amplifier // Optical Fiber Communication Conference.— 2000.— Vol. 37.— P. 53.

5. Берикашвили В. Ш., Григорьянц В. В., Ключник Н. Т. и др. Планарные волноводные структуры из кварцевого стекла, полученные в СВЧ-плазме пониженного давления // Мат-лы II Межрег. семин. «Нанотехнологии и фотонные кристаллы».— М.: МГТУ им. Н. Баумана, 2004.— С. 283—289.

6. Honkanens Li. M. J. Ion-doped arrayed optical waveguides // Applied Physics Letters.— 1991.— Vol. 58, N 23.— P. 2607—2609.

7. Suzuki K., Kubota H., Nakazawa M. 1 Tb/s (40 Gb/s × 25 channel) DWDM quasi-DM soliton transmission over 1500 km using dispersion managed single-mode fiber and conventional C-band EDFAs // Optical Fiber Communication Conference.— 2001.— Vol. 54.— P. 235—237.

8. Фритц Дж. Устройства DWDM для корпоративных сетей // Сети.— 2001.— № 6.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ



МОСКВА, 8—10 сентября 2005 г.

**Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
при участии ОАО ЦНИТИ “Техномаш”**

XI Международная научно-техническая конференция

ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ

(Материалы и устройства функциональной электроники и нанофотоники)

XVII Международный симпозиум

ТОНКИЕ ПЛЕНКИ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

Посвящается 175-летию МВТУ

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

Электронные технологии в машиностроении.

Вакуумное технологическое оборудование и системы автоматического управления.

Материалы, оборудование и технологии наноэлектроники и нанофотоники.

Нанотехнологии и фотонные кристаллы.

Новые технологии производства, обработки и исследования наноматериалов.

Технологии и оборудование для производства приборов электронной техники и радиоэлектронных устройств.

Наноструктурированные материалы и фотонные кристаллы в оптоэлектронике, медицине и оптическом приборостроении.

Микроэлектромеханические системы в медицине и промышленности.

Получение, свойства и применение тонких пленок в электронике.

Системы и устройства радиотехники и средств связи.

Методы контроля функциональных свойств материалов электронной техники, измерительная аппаратура и аналитические методы.

Моделирование и информационное обеспечение исследований.

☎ (095)267-0983, факс (095)267-1739; E-mail: bulygina@mx.bmstu.ru

К. т. н. О. Н. ПАУЛИН, к. т. н. Ф. С. ШАПО, Н. И. СИНЕГУБ

Дата поступления в редакцию
26.01 2005 г.

Украина, Одесский национальный политехнический университет
E-mail: paulin@te.net.ua; stani@te.net.ua

Оппонент к. т. н. Г. В. КУЦЕНКО
(НТК "Импульс", г. Киев)

МОДЕЛЬ СУММАТОРА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВЫПОЛНЕНИЕМ МИКРООПЕРАЦИЙ

Подтверждено повышение быстродействия суммирующих устройств с параллельным выполнением микроопераций процесса суммирования чисел с плавающей запятой по сравнению с последовательным выполнением.

Временные параметры вычислительных систем являются одними из главных характеристик их функционирования. Для предварительной оценки этих параметров целесообразно осуществлять моделирование вычислительных систем на основе современных специализированных языков и соответствующих САПР.

Наиболее быстродействующим из известных суммирующих устройств является устройство для суммирования чисел с плавающей запятой с параллельным выполнением микроопераций вычисления модуля разности порядков и предварительной подготовки всех возможных частичных сумм мантисс слагаемых (рис. 1) [1]. Теоретические исследования показали, что данное устройство должно быть приблизительно на 40% быстрее распространенных суммирующих устройств с последовательным выполнением микроопераций процесса суммирования чисел с плавающей запятой [1, 2]. Для подтверждения результатов исследования целесообразно провести моделирование данных устройств суммирования и сравнить полученные при этом их временные характеристики.

Эффективным средством для моделирования цифровых устройств является программный пакет Active-HDL [3]. Среда Active-HDL включает в себя высоко-

скоростное компилирующее ядро, обеспечивающее моделирование проектов высокой степени сложности, и предоставляет пользователю широкий спектр возможностей для проведения имитационного моделирования проектов и визуализации полученной информации.

Для моделирования цифрового устройства на языке Verilog необходимо создать функциональную модель данного устройства высокого уровня абстракции [4]. Далее, в соответствии с нисходящей методологией проектирования цифрового устройства, осуществляется структурная декомпозиция устройства. Полученные структурные компоненты в свою очередь могут быть разделены на компоненты более низкого уровня либо реализованы операторами языка Verilog на поведенческом (алгоритмическом) уровне. Таким образом, по окончании каждого этапа проектирования формируется проект устройства с более подробным уровнем детализации интерфейса устройства, алгоритмов функционирования, показателей быстродействия и т. п. в сравнении с аналогичным описанием на предыдущем этапе.

Предлагаемая функциональная модель суммирующего устройства двух чисел с плавающей запятой $A = m_a \cdot 2^{P_a}$ и $B = m_b \cdot 2^{P_b}$ на высшем уровне абстракции Adder_With_Floating_Comma, Verilog-описание (модуль) которой приведено на листинге 1, содержит пять входных портов (P_a _In — вход порядка P_a и M_a _In — вход мантиссы m_a числа A , P_b _In — вход порядка P_b и M_b _In — вход мантиссы m_b числа B , CLK — вход сигнала синхронизации) и два выходных порта (P_c _Out — выход порядка P_c и M_c _Out — выход мантиссы m_c суммы чисел $C = m_c \cdot 2^{P_c}$). Здесь

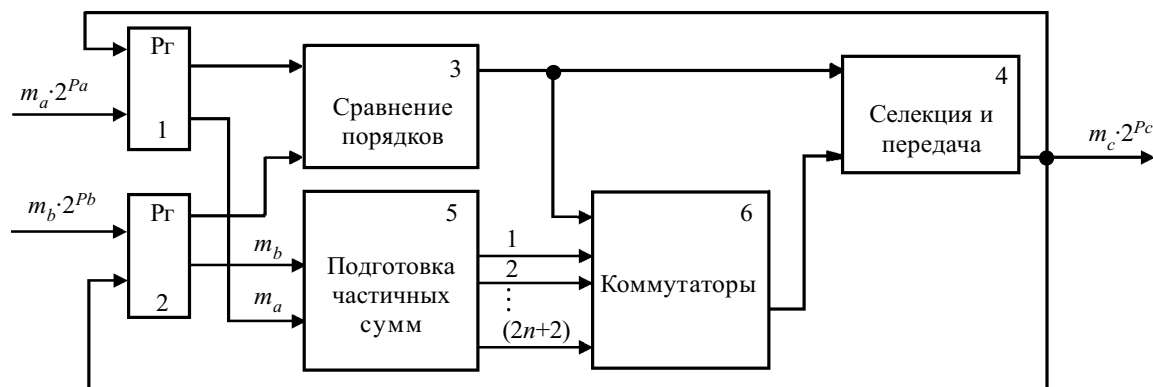


Рис. 1. Структурная схема быстродействующего устройства для суммирования чисел с плавающей запятой

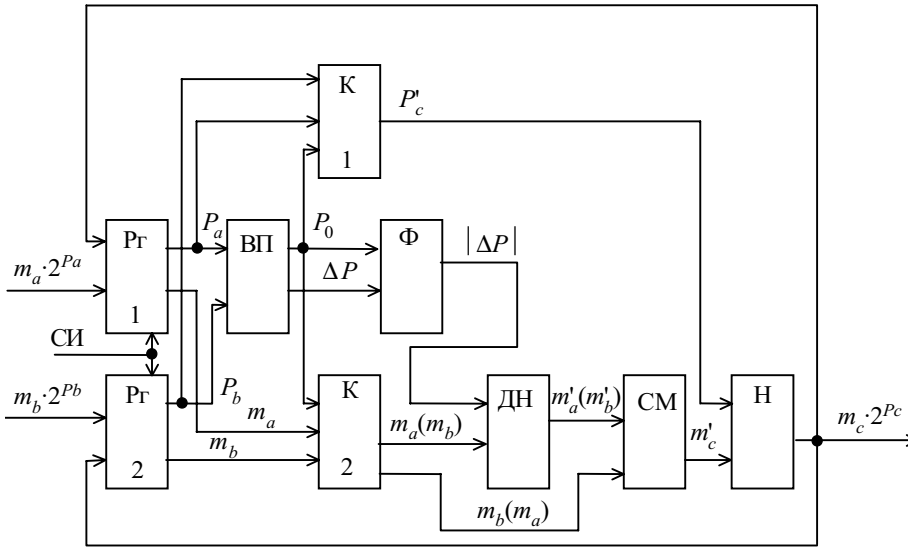


Рис. 2. Структурная схема суммирующего устройства чисел с плавающей запятой СУ1

используются настраиваемые параметры “разрядность порядков” — l и “разрядность мантисс” — n .

С целью дальнейшей структурной декомпозиции модели `Adder_With_Floating_Comma` в качестве первого устройства для моделирования выберем суммирующее устройство чисел с плавающей запятой СУ1 (рис. 2), реализующее процедуру суммирования путем последовательного выполнения во времени микроопераций “классической” макрооперации суммирования [2, 5]. Здесь Pr1, Pr2 — регистры 1, 2 слагаемых $A = m_a \cdot 2^{P_a}$, $B = m_b \cdot 2^{P_b}$, соответственно; K1, K2 — блоки коммутаторов 1, 2; ВП — блок вычитания порядков; Ф — блок формирователя модуля разности порядков; ДН — блок денормализации; СМ — блок сумматоров мантисс; Н — блок нормализации суммы чисел $C = m_c \cdot 2^{P_c}$; СИ — синхриомпульсы (CLK).

Листинг 1

Verilog-описание функциональной модели `Adder_With_Floating_Comma`

```
// Заголовок модуля суммирующего устройства
module Adder_With_Floating_Comma (CLK,
Ma_In, Mb_In, Mc_Out, Pa_In, Pb_In, Pc_Out);
```

```
// Модуль Adder_With_Floating_Comma с интерфейсом из 7 портов
```

```
input Pa_In, Ma_In, Pb_In, Mb_In, CLK; // Входные сигналы
```

```
output Pc_Out, Mc_Out; // Выходные сигналы
parameter l = 2; // Разрядность задана с помощью настраиваемого параметра l
```

```
parameter n = 7;
wire CLK; // Цепь
```

```
wire [l:0] Pa_In, Pb_In, Pc_Out; // Создание векторов цепей (l-й бит – старший)
```

```
wire [n:0] Ma_In, Mb_In, Mc_Out;
always @ (posedge CLK) // Поведенческие операторы
```

```
// Внутренняя реализация модуля
endmodule // Конец модуля
```

В блоке ВП данного устройства вычисляется разность порядков ΔP (которая называется выравнива-

ющей разностью (ВР)). По знаку ВР P_0 в блоке Ф формируется модуль ВР ($|\Delta P|$), в блоке K1 выбирается максимальный порядок, а в блоке K2 — мантисса слагаемого с меньшим порядком. В блоке ДН выбранная мантисса сдвигается вправо на число разрядов, равное значению $|\Delta P|$. В блоке СМ мантиссы слагаемых, полученные после выравнивания порядков, складываются и в блоке Н производится нормализация результата суммирования мантисс слагаемых m'_c и коррекция максимального порядка P'_c .

Дальнейшей декомпозицией модели на высшем уровне абстракции с целью создания

Verilog-описания функциональной модели устройства СУ1 является формирование Verilog-описаний функциональных моделей всех блоков, входящих в состав устройства СУ1. Оригинальными функциональными моделями блоков этого устройства являются: Reg (Pr), Diff_Ord (ВП), Comm (K), Form (Ф), Denorm (ДН), Full_Adder (СМ), Norm (Н).

Пример оригинального Verilog-описания модели блока сумматоров мантисс Full_Adder представлен на листинге 2. Здесь, как и во всех остальных модулях, используется настраиваемая внутри данного модуля константа — параметр `Setting_Time`, с помощью которой задается время срабатывания блока сумматоров мантисс исходя из значений временных параметров элементов используемой элементной базы.

Листинг 2

Verilog-описание функциональной модели блока сумматоров мантисс Full_Adder

```
`timescale 10 ns / 1 ps
// Заголовок модуля блока сумматоров
module Full_Adder (Carry_In, Mant_1, Mant_2,
Sum, Carry_Out);
```

```
input Carry_In, Mant_1, Mant_2;
output Sum, Carry_Out;
```

```
parameter Setting_Time = 10;
parameter n = 7;
```

```
parameter k = n-1;
wire Carry_In, Carry_Out;
```

```
wire [n:0] Mant_1, Mant_2, Sum;
wire [k:0] P; // Нулевая n-разрядная константа
```

```
assign #Setting_Time {Carry_Out, Sum} = Mant_1 + Mant_2 + {P, Carry_In};
```

```
endmodule
```

Все модели блоков (точнее, их Verilog-описания) предварительно моделируются в среде Active-HDL с целью проверки корректности функционирования данных моделей. В качестве примера на рис. 3 показана временная диаграмма работы модуля Full_Adder, на входы которого Carry_In, Mant_1, Mant_2 поступают

Name	Value	100 ns	150
Carry_In	1		
Mant_1	88	88	
Mant_2	88	88	
Sum	11	XX	11
Sum(7)	0		
Sum(6)	0		
Sum(5)	0		
Sum(4)	1		
Sum(3)	0		
Sum(2)	0		
Sum(1)	0		
Sum(0)	1		
Carry_Out	1		

Рис. 3. Временная диаграмма работы модуля Full_Adder

отображаемые в шестнадцатеричном и двоично-шестнадцатеричном кодах значения сигналов «1» (1), «10001000» (88) и «10001000» (88), соответственно. Через время задержки, определяемое параметром Setting_Time = 10, в соответствии с функциональным назначением блока сумматоров мантисс, на выходах Sum, Carry_Out модуля формируются значения суммы мантисс «00010001» (11) и переноса «1» (1), соответственно.

Из Verilog-описаний моделей блоков устройства СУ1 с использованием объявленных сигналов формируется Verilog-описание функциональной модели устройства СУ1.

На рис. 4 показана полученная в результате моделирования в среде Active-HDL устройства СУ1 временная диаграмма его работы. Здесь информация представлена в шестнадцатеричном коде: m_a (Ma_In) = 96, P_a (Pa_In) = 3, m_b (Mb_In) = 96, P_b (Pb_In) = 1, m_c (MRes_Out) = BB, P_c (PRes_Out) = 3. Устройство СУ1 запускается передним фронтом синхросигнала CLK, и из временной диаграммы видно, что время срабатывания данного устройства равно 280 нс. Таким образом, в результате моделирования устройства СУ1 определилось время задержки суммирующего устройства с последовательным выполнением во времени микроопераций «классической» макрооперации суммирования чисел с плавающей запятой.

В качестве второго устройства для моделирования рассмотрим суммирующее устройство чисел с плавающей запятой СУ2, функциональная модель

Name	Value	50	100	150	200	250	300	350	400	430 ns	500
CLK	0										
Ma_In	96	96									
Pa_In	3	3									
Mb_In	96	96									
Pb_In	1	1									
MRes_Out	BB	XX									BB
PRes_Out	3	X									3

Рис. 4. Временная диаграмма работы СУ1

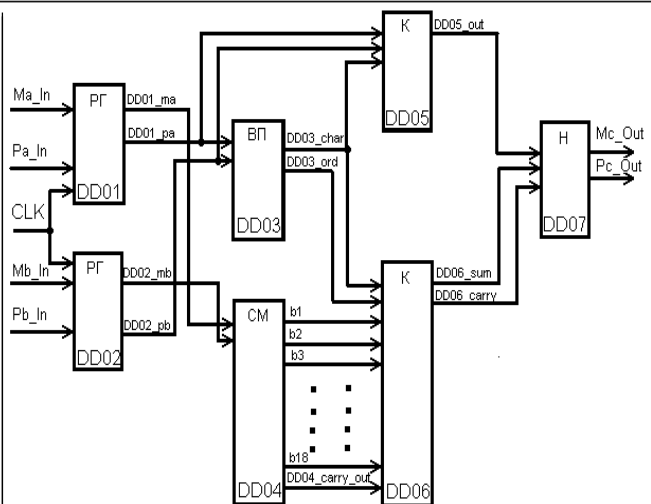


Рис. 5. Функциональная модель устройства СУ2

которого представлена на рис. 5. Устройство реализует процедуру суммирования путем параллельного выполнения во времени микроопераций вычисления модуля разности порядков и подготовки $(2n + 2)$ частичных n -разрядных сумм мантисс слагаемых ($n = 8$) с последующим затем выбором необходимой частичной суммы аналогично устройству на рис. 1.

При составлении Verilog-описания модели устройства СУ2 в нем используются Verilog-описания следующих функциональных моделей блоков устройства СУ1: Reg, Diff_Ord, Comm (в новом проекте назван Comm_1), Norm. Дополнительно в СУ2 применяются оригинальные функциональные модели блоков: Full_adder — блок подготовки $(2n + 2)$ частичных n -разрядных сумм мантисс слагаемых m_a и m_b , в состав которого входят двухоперандные n -разрядные сумматоры adder_AB (здесь $n = 8$); adder_AB — двухоперандный n -разрядный сумматор ($n = 8$); Comm — коммутатор модифицированный, где по значению знака и модуля разности порядков выбирается нужная частичная сумма. При этом временные характеристики однотипных модулей данного устройства и устройства СУ1 равны.

На рис. 6 представлена временная диаграмма работы устройства СУ2, при этом СУ2 срабатывает по переднему фронту синхросигнала CLK. Из временной диаграммы следует, что время задержки данного суммирующего устройства равно 180 нс.

Сравнивая время задержек устройств СУ1 и СУ2, получаем, что устройство СУ2 примерно на 50% быстрее суммирующего устройства СУ1.

Name	Value	50	100	150	200	250	300	330 ns	400	450
CLK	0									
Ma_In	96	96								
Pa_In	3	3								
Mb_In	96	96								
Pb_In	1	1								
Mc_Out	BB	XX								BB
Pc_Out	3	X								3

Рис. 6. Временная диаграмма работы СУ2

Таким образом, полученные результаты поведенческого моделирования рассмотренных суммирующих устройств подтвердили правильность расчетов временных параметров устройств суммирования, представленных в [1], т. е. подтвердили повышение быстродействия суммирующих устройств с параллельным выполнением микроопераций. Кроме того, из отлаженных Verilog-описаний функциональных моделей типовых блоков, входящих в состав суммирующего устройства чисел с плавающей запятой, в дальнейшем возможен синтез оригинальных структур суммирующих устройств чисел с плавающей запятой.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Синегуб Н. И. Сумматоры чисел с плавающей запятой // Тр. Одес. политехн. ун-та.— 2004.— № 1.— С. 96—99.
2. Самофалов К. Г., Луцкий Г. М. Структуры и организация функционирования ЭВМ и систем.— Киев: Вища школа, 1978.
3. ALDEC's EVITA InterActive-HDL Tutorial.— Aldec, Inc.: Henderson, NV 89014.
4. Кондратенко Ю. П., Мохор В. В., Сидоренко С. А. Verilog-HDL для моделирования и синтеза цифровых электронных схем.— Николаев: Изд-во НГТУ, 2002.
5. Паулин О. Н., Синегуб Н. И. О некоторых способах повышения быстродействия сумматоров/вычитателей с плавающей запятой / Деп. в ГНТБ Украины 28.07.97, № 441-Ук97.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

ЩОРІЧНА СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВИСТАВКА

ЕНЕРГЕТИКА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА АВТОМАТИКА



7-10 червня, 2005 р.
Донецьк, Україна



ПРОГРАМА:

ПРЕЗЕНТАЦІЇ ФІРМ - УЧАСНИЦЬ ВИСТАВКИ
ДІЛОВІ ПЕРЕГОВОРИ
НАУКОВО - ПРАКТИЧНІ СЕМІНАРИ

Головний інформаційний спонсор:



Тел./факс: (062) 381-21-50, 381-21-41, (0622) 57-07-32
E-mail: Zaharov@expodon.dn.ua
Borisenko@expodon.dn.ua
Nataly@expodon.dn.ua
<http://www.expodon.dn.ua>

Спеціалізований виставковий центр «ЕкспоДонбас»
вул. Челюскінців, 189-в, Донецьк, Україна, 83048



К. х. н. В. Я. МИХАЙЛОВСКИЙ, Ю. И. ФЕДИНЧУК

Дата поступления в редакцию
30.12.2004 г.

Украина, г. Черновцы, Институт термоэлектричества
E-mail: ite@inst.cv.ua

Оппонент д. ф.-м. н. Н. Д. РАРАНСКИЙ
(ЧНУ им. Юрия Федьковича, г. Черновцы)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАТАЛИТИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРАХ

Обоснованный выбор величины коэффициента конвективного теплообмена позволяет оптимизировать системы подвода и отвода тепла и, как следствие, повысить КПД генератора в целом.

Нормальное функционирование различной электронной аппаратуры в значительной степени определяется стабильностью параметров источника электрической энергии и тепловых режимов электронных устройств, что особенно важно в условиях автономного их использования при пониженных температурах. Для таких случаев весьма перспективными являются термоэлектрические генераторы (ТЭГ) на органическом топливе [1—3]. ТЭГ имеют длительный ресурс работы, надежны, а также позволяют получать одновременно электрическую энергию для питания электронного устройства и тепловую энергию для создания необходимого теплового режима устройства в целом. Области применения термогенераторов для питания различных электронных устройств, в которых они имеют преимущества перед другими источниками электрической энергии, приведены в таблице [4].

В качестве источников тепла для термоэлектрических генераторов используют пламенные или каталитические горелки. Каждый из таких источников тепла имеет свои преимущества и недостатки, которые необходимо учитывать в конкретных условиях применения ТЭГ. С точки зрения автономности и надежности термоэлектрического генератора более перспективными являются каталитические горелки, в которых реализована схема встречной подачи топлива и воздуха на катализатор.

Физическая модель каталитического ТЭГ со встречной подачей реагентов и распределение тепловых потоков в нем приведено на рис. 1.

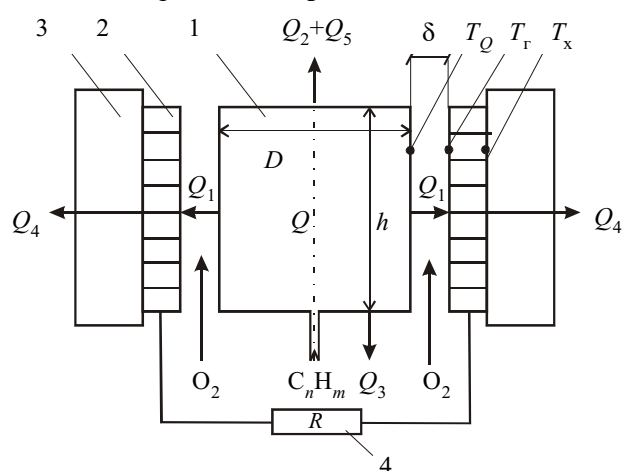
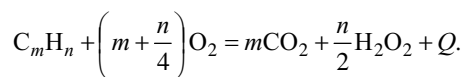


Рис. 1. Физическая модель каталитического ТЭГ со встречной подачей реагентов:
1 — каталитический источник тепла; 2 — термобатарея; 3 — холодный теплообменник; 4 — внешняя нагрузка

На схеме T_Q , T_G , T_x — значения температуры источника тепла, горячего и холодного спаев термобатареи (ТЭБ), соответственно.

Источником тепла в ТЭГ является химическая реакция окисления углеводородного топлива на катализаторе, в результате чего выделяется некоторое количество тепла Q :



Области использования термоэлектрических генераторов

Промышленность	Катодная защита, автономная охрана и сигнализация, телеметрический контроль параметров нефте- и газопроводов, резервные и аварийные источники питания технологических процессов
Связь	Радиорелейные станции, ретрансляция, радиотелефон в автономных условиях, резервное питание ЭВМ, информационные табло
Транспорт	Аварийная путевая сигнализация, зарядка аккумуляторных батарей, системы подогрева салона и двигателя автомобиля
Океанология	Буи, маяки, сейсмическое оборудование
Метеорология	Автономные метеостанции, приборы сбора и контроля данных
Геологическая разведка	Автономные источники питания радиостанций, полевых лабораторий, сигнальных устройств
Наука	Обеспечение автономности контрольно-измерительных приборов
Быт	Электро- и теплообеспечение квартир, дач, гаражей, кемпингов, автономное и резервное питание теле- и радиоаппаратуры, электроприборов, средств малой механизации

Тепло, которое передается от источника тепла к ТЭБ излучением и конвекцией, обозначено на схеме как Q_1 . Потери тепла с верхнего торца горелки состоят из тепловых потерь за счет излучения и конвекции (Q_2) и потерь тепла, обусловленных отводом в окружающую среду горячих продуктов реакции (Q_3). Потери тепла с нижнего торца горелки обозначены как Q_4 . Тепло, которое отводится от термоэлектрического преобразователя холодным радиатором, обозначено как Q_4 .

Для представленной модели ТЭГ теплопередача конвекцией — один из основных путей переноса тепла.

Основной трудностью при расчете количества тепла, передаваемого конвекцией, является определение коэффициента конвективного теплообмена α , поэтому очень важным является детальное его исследование в системах подвода и отвода тепла от термобатарей.

Обоснованный выбор величины коэффициента конвективного теплообмена для реальной конструкции ТЭГ позволит определить основные пути оптимизации систем подвода и отвода тепла и, как следствие, приведет к повышению КПД генератора в целом.

Цель данной работы — определение величины коэффициентов конвективного теплообмена в каталитическом термоэлектрическом генераторе со встречной подачей реагентов и выявление зависимостей α от физических и геометрических характеристик ТЭГ.

Известно, что перенос тепла конвекцией осуществляется в результате смешивания в пространстве неравномерно нагретых объемов газа. В соответствии с законом Ньютона–Рихмана тепловой поток пропорционален площади поверхности теплообмена (F) и разности температур поверхности (T_1) и газа (T_2) [5, с. 152]:

$$dQ = \alpha(T_1 - T_2)dF. \quad (1)$$

Как известно, коэффициент конвективного теплообмена α зависит от физических свойств теплоотдающей поверхности, ее формы и размеров, от физических свойств газа — плотности, вязкости, теплоемкости, теплопроводности, а также от скорости и природы возникновения его движения.

Исходя из (1), плотность теплового потока

$$q = \alpha(T_1 - T_2).$$

С другой стороны, если учесть, что при конвективном теплообмене тепло переносится не только конвекцией, но и теплопроводностью [6, с. 207], то

$$q = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0},$$

где λ — коэффициент теплопроводности;
 y — текущая координата.

Тогда в общем виде для коэффициента конвективного теплообмена можно записать:

$$\alpha = \frac{\lambda}{T_1 - T_2} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0}. \quad (2)$$

Для определения коэффициента конвективного теплообмена при переносе тепла от каталитической горелки к теплоприемной поверхности ТЭБ (λ_1) предложена следующая модель [8]:

1. Тепло переносится свободной конвекцией при турбулентном режиме движения газа.

2. Теплообмен осуществляется в ограниченном пространстве (щели), которое создается поверхностью катализатора и теплоприемной поверхностью ТЭБ. (Такую систему можно представить как две плоские вертикальные пластины или два коаксиально размещенных полых цилиндра, между которыми имеется узкая щель.)

3. Отношение высоты щели (h) к ее ширине (δ) удовлетворяет условию $h/\delta > 5$.

Из-за ограниченности пространства условия свободного движения газа в щели существенно отличаются от свободного движения в неограниченном пространстве. В таком случае средняя плотность теплового потока рассчитывается подобно теплопроводности [5], а коэффициент конвективного теплообмена α определяется через эквивалентный коэффициент теплопроводности $\lambda_{эф}$ и учитывает перенос тепла в щели конвекцией и теплопроводностью.

Тепловой поток в щели

$$q = \frac{\lambda_{эф}}{\delta} (T_Q - T_r), \quad (3)$$

где $\lambda_{эф} = \epsilon_k \lambda$;
 ϵ_k — коэффициент, который зависит от интенсивности свободной конвекции и определяется из выражения, полученного на основе экспериментальных данных;
 λ — коэффициент теплопроводности газа.

При конвективном теплообмене в щели для газовой среды $PrGr > 10^3$, и ϵ_k определяется по формуле [5, с. 164]

$$\epsilon_k = 0,18(PrGr)^{0,25}, \quad (4)$$

где $Pr = \nu/a$ — число Прандтля;
 $Gr = g\beta\delta^3\bar{T}/\nu^2$ — число Грасгофа;
 g — ускорение силы тяжести;
 β — коэффициент объемного расширения;
 ν — кинематический коэффициент вязкости;
 a — коэффициент температуропроводности.

В качестве определяющей температуры в выражении для числа Грасгофа взята средняя температура газа $\bar{T} = 0,5(T_Q + T_r)$.

Таким образом, получаем $\lambda_{эф} \sim \bar{T}^{0,25}$. Учитывая, что α_1 определяется через $\lambda_{эф}$, можем записать выражение для определения коэффициента конвективного теплообмена при переносе тепла от каталитического источника к теплоприемной поверхности ТЭБ:

$$\alpha_1 = 0,18\lambda \left(\frac{g\beta\delta^3}{a\nu} \right)^{0,25} \left(\frac{T_Q + T_r}{2} \right)^{0,25}. \quad (5)$$

Следует отметить, что газовая среда, в которой происходит перенос тепла от каталитической горелки к ТЭБ, состоит из азота воздуха и продуктов окисления углеводородов (углекислый газ и водяной пар). Это нужно учитывать при расчете коэффициента конвективного теплообмена, т. е.

— при окислении метана

$$\alpha_1 = 0,709\alpha_1^{N_2} + 0,093\alpha_1^{CO_2} + 0,197\alpha_1^{H_2O}; \quad (6a)$$

— при окислении пропана

$$\alpha_1 = 0,74\alpha_1^{N_2} + 0,11\alpha_1^{CO_2} + 0,16\alpha_1^{H_2O}; \quad (6б)$$

— при окислении бутана

$$\alpha_1 = 0,726\alpha_1^{N_2} + 0,112\alpha_1^{CO_2} + 0,156\alpha_1^{H_2O}. \quad (6в)$$

Здесь $\alpha_1^{N_2}$, $\alpha_1^{CO_2}$ и $\alpha_1^{H_2O}$ — значения коэффициентов конвективного теплообмена, рассчитанные по формуле (5), для азота, углекислого газа и водяного пара, соответственно.

Из полученных выражений можно для разных газов сред получить температурные зависимости коэффициента конвективного теплообмена для щелей различных размеров, что позволит определить оптимальный размер щели для каждого конкретного варианта генератора с раздельной подачей реагентов на катализатор. Размеры щели должны быть такими, чтобы, с одной стороны, реализовать близкую к максимальной теплопередачу от горелки к теплоприемной поверхности ТЭБ, а с другой — обеспечить поступление в щель необходимого количества воздуха для полного окисления топлива.

На рис. 2 приведены зависимости $\alpha_1(T)$ для случая сгорания пропан-бутановой смеси.

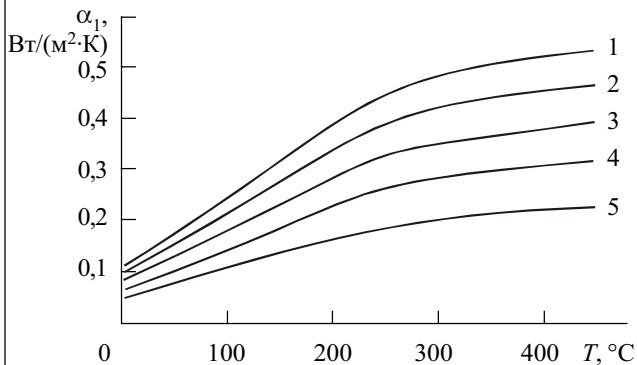


Рис. 2. Температурные зависимости коэффициента конвективного теплообмена для щелей различных размеров: 1 — $h=2$ см, $\delta=0,3$ см; 2 — $h=10$ см, $\delta=0,6$ см; 3 — $h=18$ см, $\delta=0,8$ см; 4 — $h=20$ см, $\delta=1$ см; 5 — $h=25$ см, $\delta=1,2$ см

С верхнего торца горелки тепло отводится излучением и конвекцией (рис. 1). В данной работе рассматривается та часть тепла, которая отводится за счет конвекции.

Для определения коэффициентов конвективного теплообмена для расчета потерь тепла с верхнего и нижнего торцов горелки (α_2 , α_3) воспользуемся тем, что $Nu = \alpha l_0 / \lambda$, где l_0 — определяющий размер поверхности, омываемой газом.

Верхний и нижний торцы горелки можно представить в виде горизонтальных пластин, которые омываются воздухом. В таком случае должно выполняться следующее условие: $10^3 < PrGr < 10^9$ [6, с. 226]. Определяющей температурой является температура окружающей среды T_0 , а определяющим размером — диаметр горелки D .

Число Нуссельта находится следующим образом [5, с. 163]:

$$Nu = 0,54(PrGr)^{0,25}. \quad (7)$$

В таком случае

$$\alpha = 0,54\lambda \left(\frac{g\beta}{a n D} \right)^{0,25} T_0^{0,25}. \quad (8)$$

Согласно [5, с. 163], при конвективном теплообмене с горизонтальной пластины, если ее теплоотдающая поверхность повернута вверх, рассчитанный коэффициент конвективного теплообмена (8) увеличивается на 30%, т. е.

$$\alpha_2 = 0,702\lambda \left(\frac{g\beta}{a n D} \right)^{0,25} T_0^{0,25}. \quad (9)$$

В случае, когда теплоотдающая поверхность повернута вниз, значение α , полученное из (8), нужно уменьшить на 30%:

$$\alpha_3 = 0,38\lambda \left(\frac{g\beta}{a n D} \right)^{0,25} T_0^{0,25}. \quad (10)$$

Зависимости коэффициента конвективного теплообмена от температуры при конвективном отводе тепла от торцов цилиндрической горелки представлены на рис. 3.

Тепло от термоэлектрического преобразователя отводится воздушным теплообменником при естественной конвекции воздуха. Такую систему теплоотвода можно представить в виде вертикальной пластины, размещенной в неограниченном пространстве, которая омывается воздухом. Тепло переносится при турбулентном режиме движения, поэтому $PrGr > 10^9$ [6].

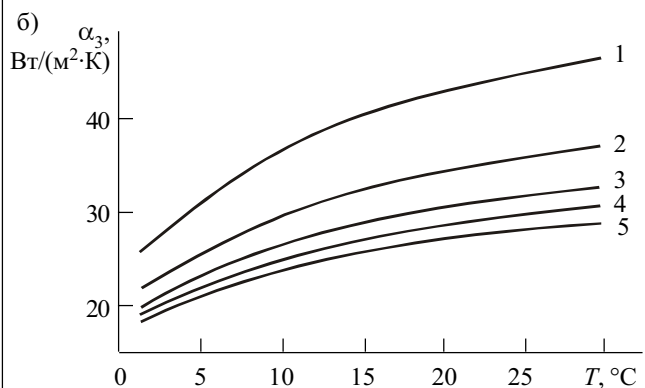
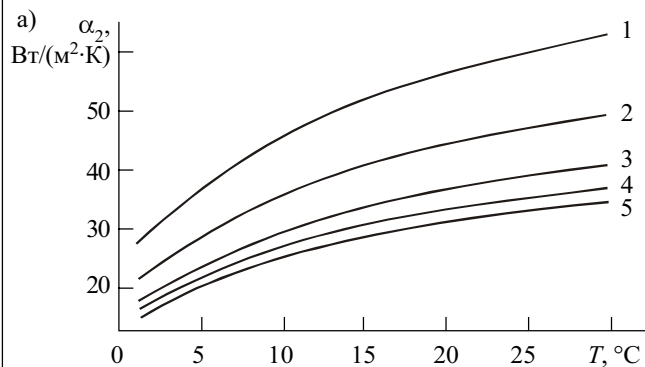


Рис. 3. Температурные зависимости коэффициента конвективного теплообмена при отводе тепла с верхнего (а) и нижнего (б) торцов горелки различного диаметра: 1 — 1 см; 2 — 5 см; 3 — 10 см; 4 — 15 см; 5 — 20 см

Для расчета коэффициента конвективного теплообмена для системы отвода тепла от термоэлектрического преобразователя (α_4) использована экспериментальная зависимость [8, с. 27]

$$Nu=0,135(PrGr)^{1/3}. \quad (11)$$

Число Грасгофа определяется по средней температуре пограничного слоя газа. В данном случае $\bar{T} = 0,5(T_x + T_0)$.

Используя выражения для определения чисел Pr, Gr и Nu, получим коэффициент конвективного теплообмена для системы отвода тепла от ТЭБ:

$$\alpha_4 = 0,135\lambda \left(\frac{g\beta}{aH} \right)^{1/3} \left(\frac{T_x + T_0}{2} \right)^{1/3}. \quad (12)$$

Если отвод тепла от термоэлектрического преобразователя осуществляется не естественной конвекцией, а принудительной, то выражение (12) существенно изменится.

Интенсивность теплообмена при вынужденном движении воздуха вдоль вертикальной пластины определяется критерием Рейнольдса (Re). В данном случае $Re > 10^4$ [5], а $Nu = 0,37Re^{0,8}Pr^{0,43}$.

Выражение для коэффициента конвективного теплообмена в случае принудительной конвекции имеет вид

$$\alpha_4^n = 0,037\lambda \left(\frac{\omega h}{\nu} \right)^{0,8} \left(\frac{\nu}{a} \right)^{0,43} \frac{\lambda}{h}, \quad (13)$$

где ω — скорость движения воздуха.

В каталитическом генераторе с совместной подачей реагентов передача большей части тепла от каталитической горелки к термоэлектрическому преобразователю осуществляется преимущественно теплопроводностью. Это обусловлено отсутствием щели между катализатором и теплоприемной поверхностью ТЭГ. В этом случае термобатарея имеет непосредствен-

ный тепловой контакт с теплоотдающей поверхностью катализатора, т. е. коэффициент α_1 теряет смысл.

Остальные тепловые потоки аналогичны тем, что рассматривались для ТЭГ со встречной подачей реагентов.

Таким образом, получена возможность оптимизации систем подвода и отвода тепла реальной конструкции термоэлектрического генератора и, как следствие, повышения его КПД в целом.

Выделяемое генератором тепло можно использовать для создания необходимого теплового режима электронных устройств в условиях работы при пониженных температурах окружающей среды.

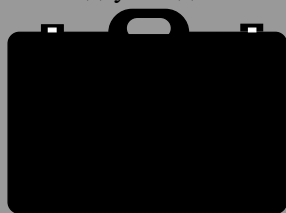
ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Михайловский В. Я. Особенности рекуперации тепла в термоэлектрических генераторах с каталитическим источником тепла // Термоэлектричество.— 2001.— № 4.— С. 74—80.
2. Михайловський В. Я. Системи запуску термоелектричних генераторів з каталітичним джерелом тепла // Термоелектрика.— 2000.— № 1.— С. 69—76.
3. Pustovalov A. A., Gusev V. V., Pubkin N. N., Nebera L. P. Catalytic thermoelectric generators operating on gas fuel // J. of Thermoelectricity.— 1994.— № 2.— Р. 90—96.
4. Михайловський В. Я. Каталітичні генератори тепла та електрики — шляхи оптимального використання енергії вуглеводневого палива // Термоелектрика.— 2001.— № 2.— С. 3—12.
5. Шве́ц И. Т., Толубинский В. И., Алабовский А. Н. Теплотехника.— М.: Высшая школа, 1976.
6. Теоретические основы теплотехники. Справочник / Под ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина.— М.: Энергоатомиздат, 1988.
7. Исаченко В. П., Осипова А. С., Суконец А. С. Теплопередача.— М.: Энергия, 1969.
8. Михайловский В. Я., Поперечный А. В. Теоретические предпосылки оптимизации микротермогенератора с каталитическим источником тепла // Термоэлектричество.— 2000.— № 4.— С. 23—31.

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

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

- Экспериментальные исследования датчика давления с пневмомеханическим резонатором. (Украина, г. Киев)
- Погрешность градуировки термодиодных сенсоров. (Украина, г. Киев)
- Кривоэлектронный преобразователь импульсов. (Россия, г. Йошкар-Ола)
- Новое поколение пьезокерамических датчиков физических величин. (Украина, г. Черкассы)
- Активное термостатирование полупроводниковых СВЧ-генераторов. (Украина, г. Днепропетровск)
- Применение феррогранатовых эпитаксиальных структур в сверхвысокочастотной электронике. (Украина, г. Львов)
- Исследование термоупругих свойств ТЭМ Пельтье. (Украина, г. Черновцы)
- Технология получения мощных диодов Шоттки на основе силицида палладия. (Беларусь, г. Минск)
- Моделирование температурного поля в кристалле иттрий-алюминиевого граната, выращиваемого двухстадийным методом Чохральского. (Украина, г. Харьков)



- Моделирование термоэлектрической системы генерирования тепловой и электрической энергии. (Украина, г. Черновцы)
- Особенности формирования твердотельной структуры МОП-транзисторов. (Беларусь, г. Минск)
- Тепловая эффективность поверхностей с пластинчато-просечным оребрением в условиях низкоскоростного обдува. (Украина, г. Киев)

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

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

Б. Н. СЕВЕРГИН, И. В. ЯКОВЛЕВ, П. А. ЯЦЫК, А. Н. БАЛАБА

Украина, г. Вишневое, НПП "Гелиос РРЛ"; г. Киев, НПП "Сатурн",
ООО "Диона-Лтд"
E-mail: vsevergin@yandex.ru

Дата поступления в редакцию
22.02 2005 г.

Оппонент к. т. н. А. Б. КОХАНОВ
(ОНАС им. А. С. Попова, г. Одесса)

УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ К_u-ДИАПАЗОНА ДЛЯ НАЗЕМНОЙ СТАНЦИИ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

Изложены результаты разработки в НПП "Сатурн" блоков усилителей мощности К_u-диапазона двух типов — с выходной мощностью 5 и 25 Вт (БУМ 5, БУМ 25).

Развитие систем спутниковой связи для передачи различных видов информации требует повышения уровня выходной мощности сигнала наземных станций при соблюдении линейности выходного сигнала. Известный производитель усилителей мощности К_u-диапазона фирма Advantech [1] выпускает ряд усилителей с выходной мощностью до 53 дБм (200 Вт) при компрессии коэффициента усиления на 1 дБ (P_{-1}) и коэффициенте усиления (K_u) до 64 дБ. Российская фирма «Радис» [2] выпускает усилители с выходной мощностью до 40 Вт и коэффициенте усиления до 53 дБ при том же критерии линейности выходного сигнала. Усилители имеют развитую систему управления и диагностики, включающую в себя микропроцессорный мониторинг и контроль, температурную компенсацию изменения коэффициента усиления, автоматическое отключение при перегреве, автоматическое отключение при высоком уровне отраженного сигнала, подачу сигнала об авариях через выходной порт на блок индикации и управления.

В настоящей статье изложены результаты разработки в НПП "Сатурн" блоков усилителей мощности К_u-диапазона двух типов — с выходной мощностью P_{-1} 5 и 25 Вт (БУМ 5, БУМ 25). Следует отметить, что усилители являются составной частью разработанного комплекта сверхвысокочастотной аппаратуры наземной станции спутниковой связи К_u-диапазона.



Рис. 1. Общий вид блока усилителя мощности К_u-диапазона

Общий вид блока усилителя мощности **БУМ 5** приведен на **рис. 1**, его структурная схема — на **рис. 2**.

БУМ 5 состоит из сверхвысокочастотного (СВЧ) усилителя мощности, блока питания DC/DC, платы питания и платы контроллера.

Блок питания DC/DC преобразует напряжение 24 В в напряжение 10 В с током нагрузки 5 А. КПД блока составляет около 80%. На входе и выходе блока установлены фильтры нижних частот, обеспечивающие фильтрацию помех.

Плата питания усилителя мощности (на схеме обведена пунктирной линией) предназначена для форми-

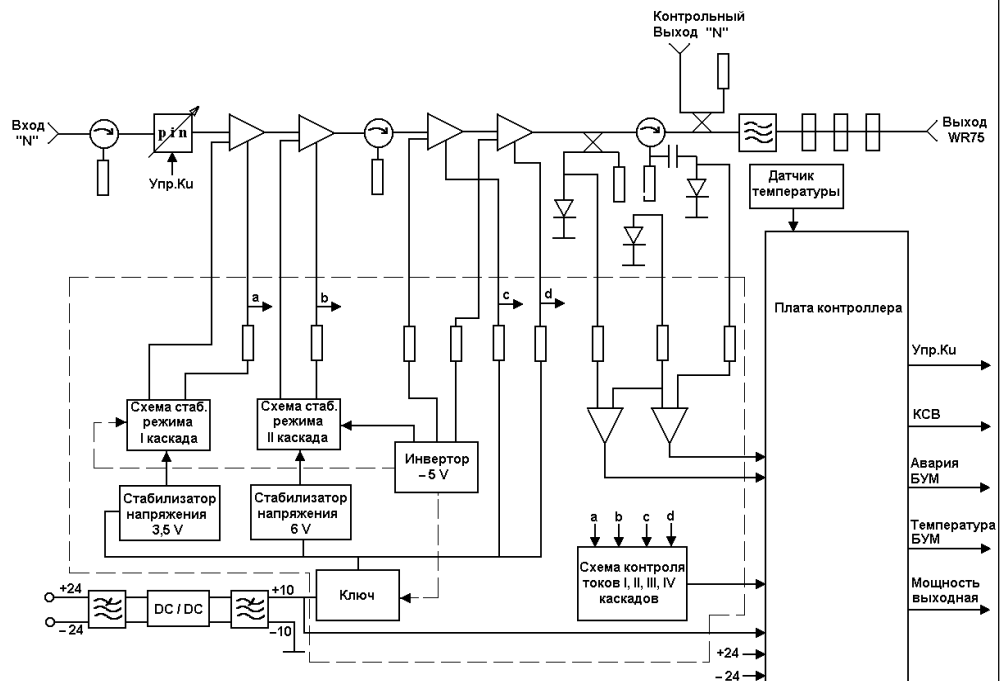


Рис. 2. Структурная схема БУМ 5

Номер каскада	1	2	3	4
Тип активного элемента	Транзистор LP6836P70 фирмы Filtronics [3]	Микросхема TMD1414-1G фирмы Toshiba [4]	Транзистор FLM 1414-4F фирмы Fujitsu [5]	Транзистор FLM 1414-8F фирмы Fujitsu
K_u , дБ	6...7	27	5...6	5...6
Напряжение стока U_c , В	3,5	6	9,8	9,8
Ток стока I_c	35...40 мА	750...800 мА	1,2 А	2,2 А
Напряжение затвора U_3 , В	—	—	-0,5	-0,5
P_{-1} , дБм	—	30	36	39

рования необходимых напряжений и токов для каскадов СВЧ-усилителя мощности и подачи их в заданной временной последовательности. Кроме того, она обеспечивает стабилизацию режимов первого и второго каскадов для уменьшения нестабильности коэффициента усиления в интервале рабочих температур.

Плата контроллера управления предназначена для контроля параметров блока усилителя мощности, автоматической коррекции коэффициента усиления, формирования сигналов аварии и информационного обмена с блоком индикации.

СВЧ-усилитель мощности содержит четыре каскада усилителей и обеспечивает общий коэффициент усиления 43...44 дБ. Основные характеристики каскадов приведены в табл. 1.

Входные и выходные цепи согласования первого каскада выполнены на поликоре толщиной $h=0,5$ мм. Входные и выходные цепи согласования второго, третьего и четвертого каскадов выполнены на подложке Duroid RT5880 ($h=0,508$ мм, толщина металлизации $t=50$ мкм).

Для компенсации температурных изменений K_u в состав усилителя включен аттенюатор, выполненный на подложке из поликора Al_2O_3 толщиной 0,5 мм. В зависимости от температуры окружающей среды схема управления аттенюатором выдает ток величины, необходимой для компенсации изменения K_u усилителя в интервале рабочих температур за счет изменения затухания аттенюатора. Электрическая схема аттенюатора приведена на рис. 3.

Аттенюатор построен на трех диодах 2A553A. Диоды имеют следующие параметры: емкость диода при обратном напряжении -10 вольт $C_{\Sigma-10 В}$ — не более 0,02 пФ, прямое сопротивление потерь R_s — не более 3 Ом при токе 20 мА. Схема включения диодов обеспечивает удовлетворительное согласование в рабочем диапазоне частот при различных токах диодов (т. е. при различных значениях затухания аттенюатора).

Экспериментальные характеристики вносимого затухания от величины тока аттенюатора приведены

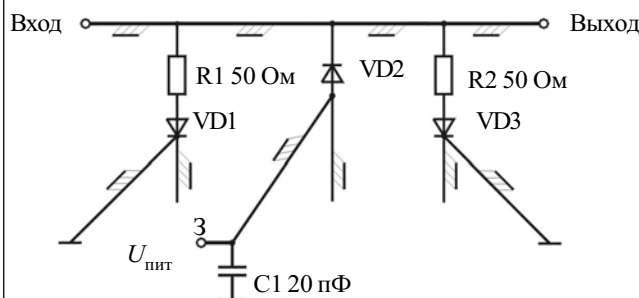


Рис. 3. Электрическая схема аттенюатора

на рис. 4. Величина коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) в рабочем диапазоне частот не превышала 1,8 при всех значениях тока.

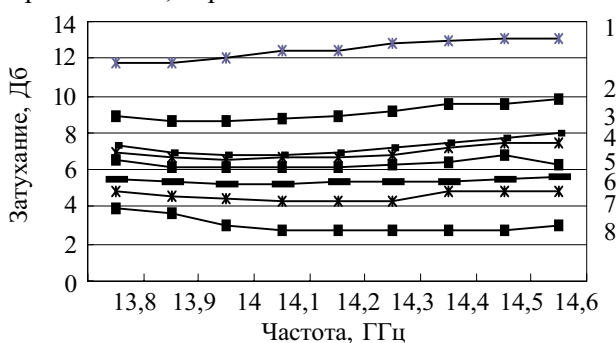


Рис. 4. Затухание аттенюатора в зависимости от тока:

1 — $I=5$ мА; 2 — 2 мА; 3 — 1 мА; 4 — 0,8 мА; 5 — 0,6 мА; 6 — 0,4 мА; 7 — 0,2 мА; 8 — 0 мА

Для подавления второй гармоники выходного сигнала в состав усилителя включен волноводный фильтр гармоник. На входе и выходе усилителя установлены микрополосковые циркуляторы ФПВН2-321-14.0. Контроль выходной мощности осуществляется с помощью детектора, установленного на выходе четвертого каскада. Контроль КСВН осуществляется с помощью детектора, установленного в третьем плече циркулятора.

Усилитель сигнала детектора выходной мощности выполнен по схеме инструментального усилителя на двух операционных усилителях. На один вход усилителя подается сигнал с диода детектора выходной мощности, на другой — напряжение пассивного диода, который служит для компенсации температурного ухода напряжения смещения рабочего диода.

Вход сигнала — коаксиальный разъем-розетка N-типа, выход — волновод WR 75.

Конструктивно БУМ 5 выполнен в виде герметичного блока. Герметизация осуществляется с помощью резинового уплотнителя. Габаритные размеры БУМ 5 — 245×300×92 мм, масса 6,5 кг.

Структурная схема БУМ 25 содержит дополнительный выходной каскад СВЧ-усилителя, датчик температуры, вентилятор и плату включения вентилятора, волноводный циркулятор на выходе блока. Включение вентилятора происходит при температуре окружающей среды +40°C. Измерение температуры производится в месте установки выходных каскадов СВЧ-усилителя. СВЧ-усилитель мощности обеспечивает общий коэффициент усиления 50...52 дБ. В СВЧ-усилителе мощности БУМ 25 первые три каскада и аттенюатор выполнены так же, как в БУМ 5, на тех

Таблица 2

Номер каскада	4	5
Тип активного элемента	Транзистор Т1М1414-18L фирмы Toshiba	Два транзистора Т1М1414-18L фирмы Toshiba (балансная схема)
K_y , дБ	6...7	6
Напряжение стока U_c , В	9	9
Ток стока I_c , А	5,5...6	11...12
P_{-1} , дБм	42...42,5	—

Таблица 3

Рабочий диапазон частот, ГГц			14...14,5
Коэффициент усиления	БУМ 5, дБ		38...41
	БУМ 25, дБ		45...48
Неравномерность коэффициента усиления	Во всем рабочем диапазоне частот, дБ		≤ 2
	В любой полосе рабочего диапазона частот 40 МГц, дБ		$\leq 0,5$
Нестабильность коэффициента усиления	При постоянном уровне входного сигнала, дБ/дБ/сут		± 1 в диапазоне рабочих температур $\pm 0,25$ при температуре 18...20°C
Выходная мощность при компрессии на 1 дБ	БУМ 5, Вт		5
	БУМ 25, Вт		25
Уровень интермодуляционных составляющих третьего порядка в рабочем диапазоне частот	при подаче двух синусоидальных сигналов, отстоящих друг от друга на 5 МГц, с суммарной мощностью не менее	2,5 Вт, БУМ 5, дБс	-27
		12,5 Вт, БУМ 25, дБс	-23
Уровень паразитных составляющих в диапазоне рабочих частот	при выходной мощности	5 Вт, БУМ 5, дБс	≤ 60
		25 Вт, БУМ 25, дБс	≤ 60
Уровень мощности сигналов второй и третьей гармоник на выходе	при выходной мощности	5 Вт, БУМ 5, дБс	≤ 65
		25 Вт, БУМ 25, дБс	≤ 65
Уровень преобразования АМ/ФМ	при выходной мощности	5 Вт, БУМ 5, °дБ	≤ 3
		25 Вт, БУМ 25, °дБ	≤ 3
Входной КСВН			$\leq 1,25$
Выходной КСВН			$\leq 1,25$
Контрольный выход	Переходное затухание, дБ		38...42
КСВН контрольного выхода			$\leq 1,8$
Напряжение питания, В			24 \pm 2,4
БУМ 5 и БУМ 25 должны вырабатывать цифровые сигналы	аварии БУМ		
	превышения КСВН выхода		Более 2
	рабочей температуры выходного каскада с точностью, °С		± 2

же элементах. Характеристики четвертого и пятого каскадов приведены в **табл. 2**.

Входные и выходные цепи согласования четвертого и пятого каскадов выполнены на подложке Duroid RT5880 ($h=0,508$ мм, $t=50$ мкм).

Контроль выходной мощности осуществляется с помощью детектора, установленного на выходе волноводного циркулятора. Контроль КСВН осуществляется с помощью детектора, установленного в третьем плече перед поглощающей нагрузкой волноводного циркулятора.

Конструктивно БУМ 25 выполнен в виде герметичного блока. Герметизация осуществляется с помощью резинового уплотнителя.

Габаритные размеры БУМ 25 400×280×150 мм, масса 11,5 кг.

Результаты измерений электрических параметров блоков БУМ 5 и БУМ 25 приведены в **табл. 3**.

Блоки усилителей прошли следующие испытания:
— в интервале рабочих температур -40°C...+60°C;
— в интервале предельных температур -50°C...+70°C;
— на относительную влажность 92...98% при +35°C;
— на пониженное атмосферное давление 525 мм рт. ст.;

— на синусоидальную вибрацию в диапазоне 10...55 Гц с ускорением 1 г;

— на удары многократного действия с ускорением 15 г.

На оба типа усилителей разработан комплект конструкторской документации.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. <http://www.advantech.ca>
2. <http://www.radis.ru>
3. <http://www.filtronic.co.uk/>
4. <http://www.toshibasemicon.com.cn>
5. <http://www.us.eudyna.com/>

К. т. н. Б. А. ДЕМЬЯНЧУК

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

Дата поступления в редакцию
13.08 2004 г.

Оппонент к. т. н. Н. Н. КОБАК
(НТУУ "КПИ", г. Киев)

МИКРОВОЛНОВЫЙ НАГРЕВАТЕЛЬ С КОНВЕКТИВНЫМ ТЕПЛООБМЕНОМ

Обсуждаются особенности построения и расчета технических параметров преобразователя электромагнитной энергии в тепловую в качестве источника потока чистого горячего воздуха.

Технология теплового воздействия на продукцию органического или неорганического происхождения с целью ее сушки, а также технология обогрева больших помещений, как правило, не обходятся без потоков горячего воздуха. В практических приложениях, там, где по технологии обработки требуется высокотемпературный воздушный поток и необходим конструктивно простой, но мощный источник нагрева сухого воздуха, весьма перспективным может оказаться применение оригинального микроволнового нагревателя воздуха [1; 2, с. 379]. Этот экономичный и экологически безопасный преобразователь электромагнитной энергии в тепловую в условиях жестких требований к чистоте воздушного потока мог бы стать альтернативой другим нагревателям — огневым, электрическим, высокочастотным, а также традиционным микроволновым [3], применяемым, например, в цехе для производства печатных плат в процессе их сушки.

Целью данной статьи является рассмотрение особенностей построения и расчета технических характеристик такого микроволнового нагревателя с конвективным теплообменом.

Выходные раскрывы питающих волноводов конструкции подключены к вершинам волноводной гипоциклоиды (в данном случае — астроида), т. е. кривой, описываемой точкой малой окружности радиуса r , которая катится без скольжения по другой окружности радиуса R_0 внутри нее. Разветвляющиеся волноводы заполнены материалом — преобразователем электромагнитной энергии в тепловую, например, на основе термостойкого слоистого алюмосиликата, наполняемого с градиентом концентрации оксидами переходных металлов.

Ветви астроида одновременно служат мощными теплоотводящими конструкциями. Кроме того, для повышения эффективности процесса теплоотвода перпендикулярно к плоскости астроида установлены металлические теплоотводящие ребра.

Методика расчета параметров (коэффициента отражения и коэффициента преобразования) волноводного кусочно-однородного преобразователя (рис. 1)

электромагнитной энергии в тепловую по значениям предварительно измеренных коэффициентов прохождения и коэффициентов отражения слоев преобразователя приводится ниже.

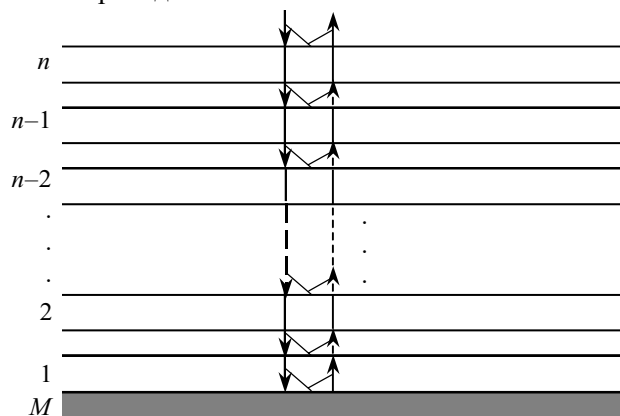


Рис. 1. Структура кусочно-однородного преобразователя электромагнитной энергии в тепловую

Ввиду малых различий в коэффициентах отражения соседних слоев, а также малых значений коэффициентов отражения верхних слоев и малых значений коэффициентов прохождения нижних слоев, целесообразно считать:

а) в n -слойной кусочно-однородной системе имеет место лишь двунаправленное распространение поля, т. е. отраженные сигналы распространяются лишь вверх (не переотражаются вниз), а прямые сигналы распространяются лишь вниз (т. е. повторных переотражений в слоях не происходит);

б) с сигналом, отраженным от металлической заглушки (M), складываются сигналы, отраженные от всех n слоев.

С учетом этих допущений, согласно рис. 1, определим максимальные (складывающиеся по мощности) значения сигнала, падающего на металлическую заглушку, и значения всех отраженных сигналов.

Прямой сигнал, падающий на поверхность металлической заглушки, равняется (по мощности)

$$A = P_0 (1 - K_{on}) \cdot K_{pn} (1 - K_{o(n-1)}) \cdot K_{p(n-1)} \cdot (1 - K_{o(n-2)}) \times K_{p(n-2)} \cdot \dots \cdot K_{p3} (1 - K_{o2}) \cdot K_{p2} (1 - K_{o1}) \cdot K_{p1}, \quad (1)$$

где P_0 — мощность сигнала, падающего на верхний n -й слой преобразователя электромагнитной энергии в тепловую;

K_{oi} — коэффициент отражения сигнала от i -го слоя, $i = 1, n$;

K_{pi} — коэффициент прохождения i -го слоя.

Отраженный от металла заглушки сигнал равняется (по мощности)

$$B = A \cdot K_{ом} (1 - K_{о2}) K_{п2} \dots K_{п(n-3)} (1 - K_{о(n-2)}) \times \\ \times K_{п(n-2)} (1 - K_{о(n-2)}) K_{п(n-1)} (1 - K_{оn}) K_{пn} (1 - K_{о(n+1)}), \quad (2)$$

где $K_{ом}$ — коэффициент отражения от металлической заглушки; $K_{о(n+1)}$ — коэффициент отражения (по мощности) от границы раздела воздушного слоя и n -го слоя покрытия.

Суммарный максимальный сигнал, отраженный от всех n слоев (по мощности), равняется

$$C = P_0 (1 - K_{о(n+1)}) \sum_{i=1}^{n-1} K_{оi} K_{п(i+1)}^2 (1 - K_{о(i+1)}) \times \\ \times \prod_{j=i+2}^n (1 - K_{оj})^2 K_{пj}^2 + P_0 K_{он}. \quad (3)$$

Тогда искомая минимальная величина коэффициента преобразования электромагнитной энергии в тепловую равняется

$$K^* = 1 - \frac{B+C}{P_0} = 1 - \left[\prod_{i=2}^n (1 - K_{оi})^2 K_{пi}^2 K_{ом} (1 - K_{о1}) K_{п1}^2 (1 - K_{о(n+1)}) + \right. \\ \left. + (1 - K_{о(n+1)}) \sum_{i=1}^{n-1} K_{оi} K_{п(i+1)}^2 (1 - K_{о(i+1)}) \prod_{j=i+2}^n (1 - K_{оj})^2 K_{пj}^2 + K_{он} \right]. \quad (4)$$

Пусть требуется оценить уровни гарантированно-го наименьшего значения коэффициента преобразования для n -слойного ($n = \overline{1,10}$) преобразователя.

Исходные данные, полученные экспериментально

$K_{о1}$	$K_{о2}$	$K_{о3}$	$K_{о4}$	$K_{о5}$	$K_{о6}$	$K_{о7}$	$K_{о8}$	$K_{о9}$	$K_{о10}$
0,55	0,50	0,40	0,30	0,20	0,15	0,10	0,05	0,02	0,01
$1 - K_{о1}$	$1 - K_{о2}$	$1 - K_{о3}$	$1 - K_{о4}$	$1 - K_{о5}$	$1 - K_{о6}$	$1 - K_{о7}$	$1 - K_{о8}$	$1 - K_{о9}$	$1 - K_{о10}$
0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,85	0,90	0,95	0,98	0,99
$K_{п1}$	$K_{п2}$	$K_{п3}$	$K_{п4}$	$K_{п5}$	$K_{п6}$	$K_{п7}$	$K_{п8}$	$K_{п9}$	$K_{п10}$
0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,65	0,70	0,75

Согласно исходным данным, например, представленным в **таблице**, получаем, что, в соответствии с формулой (4), значения коэффициента преобразования электромагнитной энергии в тепловую в зависимости от количества $n=1,2,\dots,10$ слоев кусочно-однородной структуры равняются:

$$K^*(1) = 0,442; K^*(2) = 0,400; K^*(3) = 0,582; \\ K^*(4) = 0,671; K^*(5) = 0,759; K^*(6) = 0,804; K^*(7) = 0,848; \\ K^*(8) = 0,878; K^*(9) = 0,905; K^*(10) = 0,923.$$

Оценим требуемый расход микроволновой энергии на нагревание потока воздуха заданной интенсивности.

Производительность нагревателя зависит от суммарной мощности всех генераторов, количество которых всегда соответствует количеству осей гипоциклоиды. Пусть задана конструкция микроволнового нагревателя из 8 волноводных ветвей, т. е. построенная в виде гипоциклоиды с параметром $m=R_0/r=8$, представленная на **рис. 2**.

Исходные данные для расчета требуемого расхода микроволновой энергии на нагревание потока воздуха заданной интенсивности до заданной температуры:

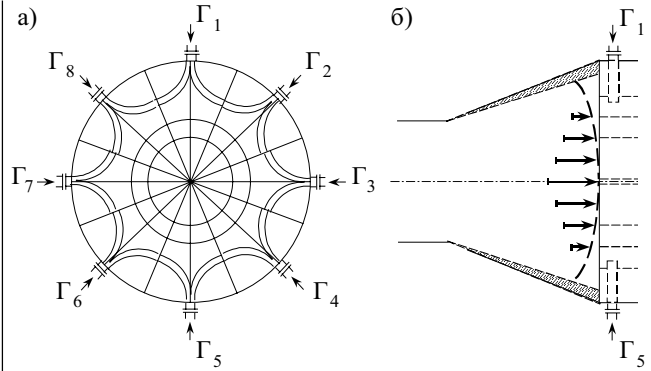


Рис. 2. Микроволновый нагреватель с конвективным теплообменом:

a — волноводная гипоциклоида-нагреватель; *b* — распределение скорости воздушного потока на входе в нагреватель; Γ — генератор

- температура воздуха на входе нагревателя, T_1 , К;
- температура воздуха на выходе нагревателя, T_2 , К;
- количество проходящего воздуха, q_n , м³/ч;
- динамическое давление воздуха в питающем воздуховоде, $H_{д1}$, Па;
- диаметр питающего воздуховода, D_1 ;
- диаметр воздуховода на входе нагревателя, $D_2=R_0/2$;
- мощность одного микроволнового генератора, P_1 ;
- размер узкой стенки волноводной ветви нагревателя, b ;
- количество волноводных ветвей нагревателя, $m_H=R_0/r$;
- количество теплоотводящих ребер, n_p ;
- длина канала теплообмена, h_H ;
- толщина основания теплоотводящего ребра, δ_0 .

Оценим значение энергии, требуемой для нагревания потока воздуха.

1. Определяющая температура воздуха в теплообменном процессе:

$$T = \frac{T_1 + T_2}{2}. \quad (5)$$

2. Кинематическая вязкость воздуха с учетом его плотности ρ , коэффициента вязкости μ_0 и постоянной воздуха C_B :

$$v = \frac{\mu_0}{\rho} \cdot \frac{273 + C_B}{T + C_B} \cdot \sqrt{\left(\frac{T}{273}\right)^3}; \mu_0 = 16,7 \cdot 10^{-6} \text{ Па};$$

$$\rho \cong 1,0 \text{ кг/м}^3; C_B = 111. \quad (6)$$

3. Средняя скорость воздуха в питающем воздуховоде:

$$\omega_1 = \frac{4q_n}{\pi(D_1)^2} \cdot \frac{1}{3600}. \quad (7)$$

4. Скорость потока воздуха ω_2 на входе нагревателя (согласно уравнению расхода газа):

$$\rho \omega_1 \pi \left(\frac{D_1}{2}\right)^2 = \rho \omega_2 \pi \left(\frac{D_2}{2}\right)^2; \omega_2 = \omega_1 \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2. \quad (8)$$

5. Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega_2 D_2}{\nu} \quad (9)$$

6. Максимальная скорость воздуха на входе нагревателя-теплообменника $\omega_{2m} = \omega_2$.

7. Распределение скоростей воздушного потока в сечении воздуховода на входе нагревателя:

$$\omega_{2x} = \omega_{2m} \left(1 - \frac{x}{R_0} \right)^n; \quad \frac{1}{7} > n > \frac{1}{10} \quad \text{при } Re > 2320;$$

$$x = \left\{ 0; \frac{R_0}{2}; \frac{3R_0}{4}; \frac{9R_0}{10} \right\}.$$

8. Толщина ламинарного слоя у стенок в сечении воздуховода на входе нагревателя:

$$h_{л} = 30 D_2 / Re^{0,875}.$$

9. Площадь поперечного сечения воздуховода на выходе теплообменной конструкции:

$$S_H = 8(R_0 - r)b + n_p R_0 \delta_0 = 8(R_0 - R_0/m)b + n_p R_0 \delta_0.$$

10. Среднее значение скорости воздушного потока в сечении на входе в теплообменный канал:

$$\bar{\omega}_2 = \sum_{i=1}^4 \omega_{2i} / 4.$$

11. Скорость воздушного потока на выходе микроволнового нагревателя с учетом площади сечения воздуховода S :

$$\omega_3 = \bar{\omega}_2 \frac{S}{S - S_H} = \bar{\omega}_2 \frac{\pi D_2^2 / 4}{\pi D_2^2 / 4 - S_H}.$$

12. Удельный требуемый приток тепла в воздушный поток (т. е. тепла, приходящегося на количество воздуха, равное 1 кг):

$$\Delta W_0 = (C_V - AR)(T_2 - T_1) + A \frac{\omega_3^2 - \bar{\omega}_2^2}{2},$$

где C_V — удельная теплоемкость воздуха при постоянном объеме;
 A — тепловой эквивалент механической работы (трения воздушного потока в теплообменнике), равный 1/427;
 R — газовая постоянная, $R=8,31$ Дж/(К·моль).

13. Время экспозиции воздуха в канале нагревания:
 $\tau = h_H / \bar{\omega}_2.$

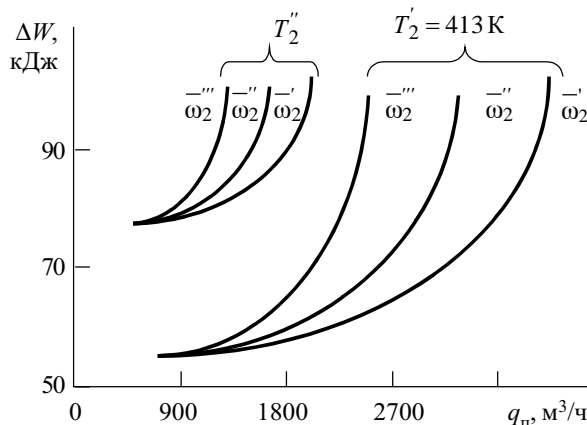


Рис. 3. Зависимость требуемого количества энергии от количества проходящего через микроволновый нагреватель воздуха (вариант $T_2'' > T_2'$; $\bar{\omega}_2''' > \bar{\omega}_2'' > \bar{\omega}_2'$)

14. Масса воздуха, нагреваемого за время экспозиции:

$$m_b = \rho \pi (D_2/2)^2 h_H.$$

15. Требуемый расход энергии электромагнитного поля на нагревание потока воздуха заданной интенсивности:

$$\Delta W = \Delta W_0 m_b = \Delta W(q_{п}). \quad (10)$$

Зависимость (10) требуемого расхода энергии поля от заданной производительности $q_{п}$ преобразователя приведена на рис. 3.

16. Требуемое количество генераторов мощностью P_1 для нагревания потока воздуха:

$$n_r = \Delta W / P_1. \quad (11)$$

Пример.

Дано: $T_1=(20+273)K$; $T_2=(140+273)K$; $q_{п}=3600$ м³/ч; $H_{л1}=15,0$ Па; $H_{л2}=3,8$ Па; $D_1=0,56$ м; $D_2=1,0$ м; $P_1=15$ кВт; $b=45 \cdot 10^{-3}$ м; $m_H=8$; $n_p=60$; $\delta_0=3 \cdot 10^{-3}$ м; $h_H=1,3$ м; $R_0=0,5$; $r=0,5/8$.

Определить: ΔW ; n_r .

Решение.

Согласно (5)–(11), находим:

$$1. T = \frac{293 + 413}{2} = 353 \text{ К}.$$

$$2. \nu = \frac{16,7 \cdot 10^{-6}}{1,0} \cdot \frac{273 + 111}{353 + 111} \cdot \sqrt{\left(\frac{353}{273}\right)^3} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}.$$

$$3. \omega_1 = \frac{3600}{3,14 \cdot \left(\frac{0,56}{2}\right)^2} \cdot \frac{1}{3600} = 4 \text{ м/с}.$$

$$4. \omega_2 = 4 \cdot \left(\frac{0,56}{1}\right)^2 = 1,26 \text{ м/с}.$$

$$5. Re = \frac{1,26 \cdot 1,0}{2 \cdot 10^{-5}} = 63 \cdot 10^3. \quad 6. \omega_{2m} = 1,26 \text{ м/с}.$$

$$7. \omega_{2x}|_{x=0} = \omega_{2m} \cdot \left(1 - \frac{0}{R_0}\right)^9 = 1,26 \text{ м/с};$$

$$\omega_{2x}|_{x=\frac{R_0}{2}} = 1,26 \cdot \left(1 - \frac{1}{2}\right)^9 = 1,17 \text{ м/с};$$

$$\omega_{2x}|_{x=\frac{3R_0}{4}} = 1,26 \cdot \left(1 - \frac{3}{4}\right)^9 = 1,08 \text{ м/с};$$

$$\omega_{2x}|_{x=\frac{9R_0}{10}} = 1,26 \cdot \left(1 - \frac{9}{10}\right)^9 = 0,98 \text{ м/с}.$$

$$8. h_{л} = \frac{30 \cdot 1,0}{Re^{0,875}} \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

$$9. S_H = 8 \cdot \left(0,5 - \frac{0,5}{8}\right) \cdot 45 \cdot 10^{-3} + 60 \cdot 0,5 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 0,25 \text{ м}^2.$$

$$10. \bar{\omega}_2 = \frac{1}{4} \cdot (1,26 + 1,17 + 1,08 + 0,98) = 1,12 \text{ м/с}.$$

$$11. \omega_3 = 1,12 \cdot \frac{3,14 \cdot 1^2 / 4}{3,14 \cdot 1^2 / 4 - 0,25} = 1,6 \text{ м/с}.$$

$$12. \Delta W_0 = \left(1000 + \frac{8 \cdot 310}{427}\right) \cdot (413 - 293) +$$

$$+ \frac{1}{427} \cdot \frac{1,6^2 - 1,12^2}{2} = 120 \text{ кДж/кг}.$$

$$13. \tau = \frac{h_H}{\omega_2} = \frac{1,3}{1,12} = 1,16 \text{ с.}$$

$$14. m_B = 1,0 \cdot 3,14 \cdot \left(\frac{1,0}{2}\right)^2 \cdot 1,3 = 1,02 \text{ кг.}$$

$$15. \Delta W = 120 \cdot 1,02 \approx 122 \text{ кДж.}$$

$$16. n_T = \frac{122}{15 \cdot 1,16} \approx 8 \text{ ед.}$$

Заметим, что нагревание потока воздуха до 140°C с производительностью 3600 м³/ч является солидной производственной задачей и, естественно, для ее выполнения требуется суммарная мощность источника, превышающая 100 кВт.

Применение такого микроволнового нагревателя с конвективным обменом в цехе в процессе сушки продукции (например печатных плат) либо для обо-

грева производственных помещений представляется новым и весьма перспективным по уровню экологичности (чистоты) рабочего агента, гибкости управления технологическим процессом обработки продукции, малогабаритности и простоте системы теплообмена, по унифицированности источника энергии, по независимости от дефицитных источников энергии и, наконец, просто по уровню энергоэкономичности системы в подобной технологии.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Пат. 67359А Украины. Спосіб та пристрій нагріву повітря / Б. А. Дем'янчук.— 2004.— Бюл. № 6.
2. Демьянчук Б. А. Принципы и применения микроволнового нагрева.— Одесса: Черноморье, 2004.
3. Княжевская Г. С., Фирсова М. Г., Килькеев Р. Ш. Высококачественный нагрев диэлектрических материалов.— Л.: Машиностроение, 1989.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

15-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» 12–16 сентября 2005 года, г. Севастополь

ДОКЛАДЫ НА КОНФЕРЕНЦИЮ ПРИНИМАЮТСЯ ДО 11 МАЯ 2005 г.
ПО СЛЕДУЮЩИМ НАПРАВЛЕНИЯМ

Твердотельные приборы и устройства СВЧ (в т. ч. интегрированные устройства для средств связи и локации, а также для сопряжения с оптоволоконными и цифровыми устройствами);

Моделирование и автоматизированное проектирование твердотельных приборов и устройств;

Электроракумные и микровакуумные приборы СВЧ;

Системы СВЧ-связи, вещания и навигации (в т.ч. методики оценки эффективности сетей связи);

Антенны и антенные элементы (в т. ч. оптические технологии в антенной технике);

Пассивные компоненты (в т. ч. устройства на магнитоэлектрических волнах);

Материалы и технология СВЧ-приборов, наноэлектроника и нанотехнология;

СВЧ-электроника сверхбольших мощностей и эффекты;

СВЧ-измерения;

Прикладные аспекты СВЧ-техники;

СВЧ-техника в медицине и экологии;

Радиоастрономия, дистанционное зондирование и распространение радиоволн;

История СВЧ-техники и телекоммуникаций (доклады о юбилеях университетов, НИИ, КБ, журналов, исторических событий, выдающихся ученых).

15-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»
12–16 сентября 2005 г., Севастополь, Украина

КрыМиКо 2005
CrIMiCo

September 12-16, 2005, Sevastopol, Ukraine
15th International Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology»

**РАБОЧИЕ ЯЗЫКИ КОНФЕРЕНЦИИ —
РУССКИЙ И АНГЛИЙСКИЙ**

Тел./факс: +380-692-440982
e-mail: crimico-2005@sinfo.net.ua
crimico-2005@mail.com
<http://www.crimico-2005.sinfo.net.ua>
<http://ieee.orbita.ru/aps/crim05r.htm>

К. т. н. В. Н. БОРОВИЦКИЙ

Украина, г. Киев, «Информационные программные системы»
E-mail: Volodymyr_Borovytsky@iss.org.ua

Дата поступления в редакцию
25.01 2005 г.

Оппонент к. т. н. С. А. ГОРЬБЕВ
(НИИ телевизионной техники, г. Одесса)

ОПТИМИЗАЦИЯ ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ФОКУСИРОВКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЦИФРОВОЙ ОПТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ

Предложенная методика позволяет вычислить оптимальный размер окна цифрового фильтра, при котором обеспечивается максимальное отношение сигнал/шум для показателя фокусировки.

Одним из ограничений в оптической микроскопии является конечная величина глубины резко изображаемого пространства (РИП) [1]. В тех случаях, когда высота неровностей на поверхности наблюдаемого объекта в поле зрения микроскопа превосходит глубину РИП, оптическое изображение будет содержать как сфокусированные, так и расфокусированные фрагменты [2]. Проведение анализа и измерений поверхности в области расфокусированных фрагментов существенно осложняется, а в ряде случаев — не представляется возможным.

С оснащением оптического микроскопа цифровыми камерами, моторизованными приводами фокусировки и перемещения образца, управляемыми при помощи компьютера, а также с началом широкого использования программных пакетов цифровой обработки изображений начинается этап цифровой микроскопии. Главными преимуществами цифрового оптического микроскопа (далее — микроскопа) являются возможности сохранения, передачи и обработки увеличенных изображений поверхности объектов в цифровом виде, что позволяет не только упростить фиксацию, тиражирование и пересылку изображений, но и существенно повысить их качество [2]. В частности, появилась возможность увеличения глубины РИП микроскопа цифровыми методами [3—10].

Следует подчеркнуть, что цифровые методы увеличения глубины РИП существенно расширили возможности оптической микроскопии [2, 3]. Во-первых, величина глубины РИП уже не будет ограничиваться такими показателями оптической системы микроскопа как числовая апертура, рабочая длина волны и др. Глубина РИП может быть существенно увеличена до величин, на порядки больших по сравнению с глубиной РИП изображения, формируемого оптической системой [9, 10]. В этом случае ограничением глубины РИП будут свойства образца — прозрачность элементов поверхности, величина коэффициента отражения или пропускания, перекрытие верхними слоями нижних, или конечное рабочее расстояние микрообъектива, и т. п. Во-вторых, цифровые

методы увеличения глубины РИП позволили с достаточно высокой точностью сформировать трехмерное изображение поверхности образцов [6]. Это открывает возможности анализа формы наблюдаемых объектов, в том числе в динамике, что необходимо при исследовании роста клеток, изменения формы деталей при механических и температурных нагрузках, газовых разрядов, источников излучения и т. п. Очевидно, что выбор алгоритма расчета показателя фокусировки будет играть определяющую роль в методах увеличения глубины РИП.

К сожалению, в большинстве работ выбор алгоритмов цифрового увеличения глубины РИП базируется на эмпирических данных, при этом не учитываются параметры элементов оптико-электронного тракта и размерные характеристики объектов наблюдения [3—10]. Это принципиально ограничивает возможности получения качественных изображений в оптической микроскопии. Поэтому актуальной и важной задачей является нахождение наиболее оптимальных алгоритмов цифрового увеличения глубины РИП, которые гарантируют получение цифровых изображений наивысшего качества.

Главная идея цифрового увеличения глубины РИП состоит в следующем [6—9] (см. **рис. 1**):

1. В автоматическом режиме с цифровой камеры считывается последовательность цифровых изображений при перемещении положения поверхности образца вдоль оптической оси микроскопа на величину, равную глубине РИП микроскопа. При этом диапазон перемещения выбирается таким, чтобы он перекрыл весь перепад по высоте поверхности наблюдаемого объекта в поле зрения микроскопа. Полученные цифровые изображения сохраняются на носителе информации.

2. Специальное программное обеспечение рассчитывает показатель фокусировки для каждого пиксела, т. е. отсчета изображения, используя информацию об его соседних пикселах. Эта операция проводится сразу над пикселами с одинаковыми индексами во всех цифровых изображениях.

Результирующее изображение формируется путем выбора из пикселов с одинаковыми индексами пиксела с самым высоким показателем фокусировки. Таким образом, результирующее изображение будет содержать только наиболее сфокусированные фрагменты из последовательности цифровых изображений. Кроме того, появляется возможность построе-

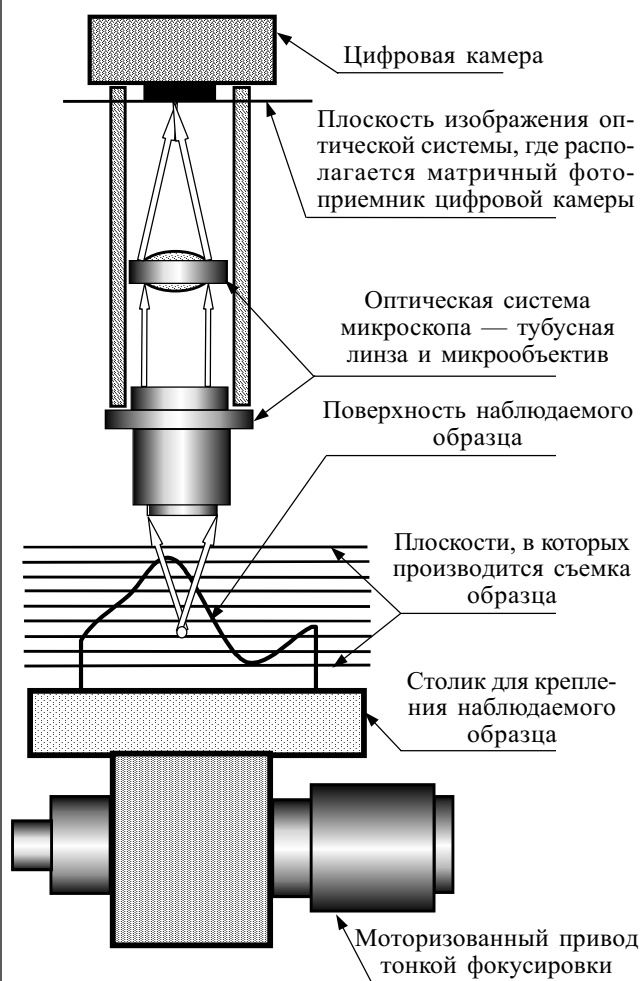


Рис. 1. Схема получения цифровых изображений с увеличенной глубиной резко изображаемого пространства

ния трехмерной карты поверхности образца [3]. Для этого необходимо построить таблицу из координат вдоль оптической оси пикселов с максимальными показателями фокусировки.

Существующие алгоритмы расчета показателя фокусировки могут быть условно разделены на следующие две группы. Первая группа объединяет алгоритмы, исходными данными для которых являются статистические параметры распределения амплитуд — среднеквадратическое отклонение, отношение сигнал/шум, отношение правдоподобия, количество информации и др. [4, 5]. Эти параметры вычисляются в окрестности пиксела, показатель фокусировки которого требуется найти. В большинстве случаев окрестность имеет форму прямоугольного окна. Несмотря на простоту вычисления и понятную интерпретацию численной оценки, алгоритмы первой группы имеют существенный недостаток — показатель фокусировки не содержит информации о пространственной структуре фрагмента изображения в окне. Поэтому, с одной стороны, для получения достоверного значения показателя фокусировки требуется окно большого размера. С другой стороны, для того чтобы не усреднить показатель фокусировки, размеры окна целесообразно уменьшить. Такая неоднозначность в определении

размера ограничивает область применения алгоритмов первой группы.

Вторая группа алгоритмов численного увеличения глубины РИП основана на применении цифровых фильтров высоких пространственных частот [6—10]. В этих алгоритмах показатель фокусировки пиксела рассчитывается как составляющая высоких пространственных частот цифрового изображения. Известно, что расфокусировка подавляет эту составляющую, а цифровое изображение будет содержать только составляющие низких пространственных частот [7]. В сфокусированных фрагментах изображения составляющие высоких пространственных частот будут присутствовать. Следовательно, фильтрация высоких пространственных частот позволяет оценить степень фокусировки для каждого пиксела, т. е. получить показатель фокусировки пиксела.

Благодаря простоте реализации, малым вычислительным затратам и высокой чувствительности к расфокусировке алгоритмы цифрового увеличения глубины РИП второй группы получили широкое распространение в оптической микроскопии [9, 10]. К сожалению, существует фактор, вносящий погрешности в расчет показателя фокусировки. Этим фактором является шум, который присутствует в реальных цифровых изображениях и который содержит составляющие высоких пространственных частот. При фильтрации высоких пространственных частот эта усиленная шумовая составляющая добавляется к полезной составляющей, содержащей информацию о фокусировке, и искажает ее.

Следует отметить, что в большинстве работ, посвященных увеличению глубины РИП, выбор цифрового фильтра осуществляется методом перебора градиентных и осесимметричных фильтров с размерами окон 2×2 , 3×3 , 5×5 , 7×7 [6—10]. При этом не учитываются ряд важных факторов, определяющих качество фокусировки. В работах [6, 8—10] игнорируется влияние передаточной функции элементов микроскопа, а в интересной работе [7] не учитывается влияние шумов и минимальных размеров объекта наблюдения. В результате предлагаемые варианты цифровых фильтров не всегда могут обеспечить достаточно высокое качество изображений с увеличенной глубиной РИП.

Задачей данной работы является разработка методики оптимизации цифрового фильтра высоких пространственных частот для вычисления показателя фокусировки в цифровой микроскопии. В отличие от известных работ [3—10] предлагается поставленную задачу рассматривать как задачу согласованной пространственной фильтрации применительно к оптико-электронному тракту микроскопа [11]. То есть искать такой цифровой фильтр, который усиливал бы полезные (информативные для оценки фокусировки) составляющие высоких пространственных частот и подавлял высокочастотные составляющие шума и низкочастотные неинформативные составляющие сигнала. Очевидно, что для решения данной задачи необходимо математически описать процесс прохождения сигналов через оптико-электронный тракт (рис. 2) и выполнить операцию оптимизации цифрового фильтра по критерию максимизации отношения сигнал/шум [11, 12]. Особо

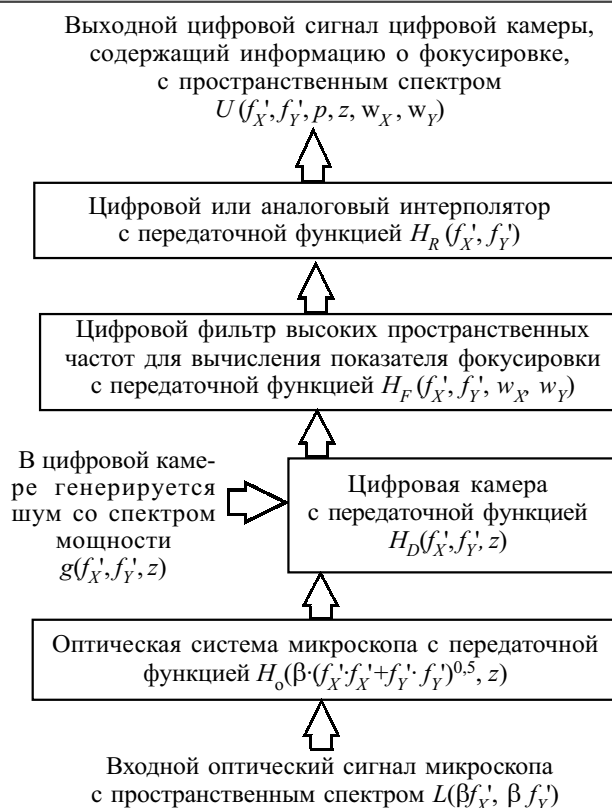


Рис. 2. Прохождение сигнала через оптико-электронный тракт микроскопа

следует подчеркнуть, что под отношением сигнал/шум будет рассматриваться отношение среднеквадратического значения амплитуды полезного (информативного для оценки фокусировки) сигнала в выходном изображении к среднеквадратическому отклонению шумовой составляющей в этом изображении [11].

При исследовании оптико-электронного тракта микроскопа примем следующие допущения, которые широко используются в инженерной практике. (Эти допущения и позволяют упростить математические преобразования и получить результат в аналитическом виде [12].)

1. Элементы оптико-электронного тракта являются линейными фильтрами пространственных частот.

2. Оптическая система является дифракционно ограниченной с круглой апертурной диафрагмой [12].

3. Фоточувствительные элементы цифровой камеры имеют прямоугольную апертуру. Матрица этих элементов имеет постоянный пространственный период [13].

4. Генерация выходного сигнала цифровой камеры сопровождается появлением шумов (см. рис. 2). Эти шумы являются стационарными, эргодичными и имеющими нормальное распределение [11].

5. Параметры оптической системы и цифровой камеры согласованы таким образом, что при пространственной дискретизации оптического сигнала не искажается пространственная структура сигнала [13].

6. Рассматриваются цифровые фильтры высоких пространственных частот двух видов — симметричный и градиентный. Варьируемым параметром таких цифровых фильтров является размер окна [6—10].

С точки зрения пространственной фильтрации оптико-электронный тракт может рассматриваться как последовательность элементов, каждый из которых является фильтром пространственных частот [12] (рис. 2):

— оптическая система — фильтр низких пространственных частот;

— цифровая камера — фильтр низких пространственных частот, периодическая структура фоточувствительных элементов, которая осуществляет пространственную дискретизацию сигнала; в цифровой камере также генерируются шумы;

— цифровой фильтр для оценивания фокусировки является фильтром высоких пространственных частот [7];

— устройство восстановления изображения является фильтром низких пространственных частот; этот фильтр преобразует дискретное цифровое изображение в непрерывное методом аналоговой или цифровой интерполяции [12].

Согласно положениям линейной фильтрации пространственный спектр сигнала и спектр мощности шума в выходном изображении могут быть рассчитаны следующим образом [11, 12] (рис. 2):

$$\begin{aligned}
 U(f'_X, f'_Y, p, z, w_X, w_Y) &= L_{\max} \cdot L(\beta f'_X, \beta f'_Y, p) \cdot K_{DM} \times \\
 &\times H_0\left(\sqrt{(f'_X)^2 + (f'_Y)^2}, z\right) \cdot H_D(f'_X, f'_Y) \times \\
 &\times H_F(f'_X, f'_Y, w_X, w_Y) \cdot H_R(f'_X, f'_Y); \\
 G(f'_X, f'_Y, w_X, w_Y) &= G_{\max} \cdot g(f'_X, f'_Y) \times \\
 &\times |H_F(f'_X, f'_Y, w_X, w_Y)|^2 \cdot |H_R(f'_X, f'_Y)|^2,
 \end{aligned} \quad (1)$$

где f'_X, f'_Y — пространственные частоты в плоскости изображения оптической системы микроскопа (все вычисления далее будут приведены к плоскости изображения — см. рис. 1);

β — линейное увеличение оптической системы микроскопа;

$U(f'_X, f'_Y, p, z, w_X, w_Y)$ — пространственный спектр двумерного выходного полезного цифрового сигнала, который используется для оценивания фокусировки;

$G(f'_X, f'_Y, w_X, w_Y)$ — пространственный спектр мощности шумовой составляющей двумерного выходного сигнала;

$L(f'_X, f'_Y, p)$ — нормированный по максимальному значению пространственный спектр полезной (информационной для фокусировки) составляющей входного сигнала (в данном случае — это нормированный пространственный спектр производной двумерного входного оптического сигнала, который несет информацию о высоких пространственных гармониках);

p — характерный пространственный период наблюдаемого объекта, который характеризует его пространственную структуру;

w_X, w_Y — размеры окна цифрового фильтра для увеличения глубины РИП;

$g(f'_X, f'_Y)$ — нормированный по максимальному значению пространственный спектр мощности шумовой составляющей сигнала, генерируемой в цифровой камере (т. к. в большинстве случаев принимается допущение о том, что шумы разных фоточув-

ствительных элементов цифровой камеры являются некоррелированными, то этот спектр может рассматриваться как двухмерный пространственный спектр белого шума — $g(f_X, f_Y) = 1$ [12];

$L_{\max}, G_{\max}, K_{DM}$ — максимальные значения полезной составляющей входного сигнала, спектра мощности шумовой составляющей, а также коэффициент пропорциональности между выходным электрическим и входным оптическим сигналами, соответственно (значения этих констант могут быть рассчитаны по известным формулам [11, 12];

$H_0(f', z)$ — оптическая передаточная функция оптической системы микроскопа, которая зависит от величины расфокусировки вдоль оптической оси z .

Оптическая передаточная функция такой системы может быть записана в следующем виде [14, с. 176]:

$$\begin{aligned}
 H_0(f', z) &= H_0\left(\sqrt{(f_X')^2 + (f_Y')^2}, z\right) = \\
 &= \begin{cases} H_1(f', z) - H_2(f', z) - H_3(f', z), & f' < f_{\max}' ; \\ 0, & f' \geq f_{\max}' ; \end{cases} \\
 H_1(f', z) &= \frac{4}{\pi \cdot W(f', z)} \cdot \cos\left(W(f', z) \cdot \frac{f'}{f_{\max}'}\right) \times \\
 &\times \arccos\left(\frac{f'}{f_{\max}'}\right) \cdot J_1(W(f', z)); \\
 H_2(f', z) &= \frac{4}{\pi \cdot W(f', z)} \cdot \cos\left(W(f', z) \cdot \frac{f'}{f_{\max}'}\right) \times \\
 &\times \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{(-1)^i}{2i}\right) \cdot \sin\left(2i \cdot \arccos\left(\frac{f'}{f_{\max}'}\right)\right) \times \\
 &\times (J_{2i-1}(W(f', z)) - J_{2i+1}(W(f', z))); \\
 H_3(f', z) &= \frac{4}{\pi \cdot W(f', z)} \cdot \sin\left(W(f', z) \cdot \frac{f'}{f_{\max}'}\right) \times \\
 &\times \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{(-1)^i}{2i+1}\right) \cdot \sin\left(2i \cdot \arccos\left(\frac{f'}{f_{\max}'}\right)\right) \times \\
 &\times (J_{2i}(W(f', z)) - J_{2i+2}(W(f', z))); \\
 W(f', z) &= 4\pi \frac{f'}{f_{\max}'} \frac{z}{\lambda}. \tag{2}
 \end{aligned}$$

Здесь f'_{\max} — максимальная пространственная частота оптического сигнала в плоскости изображения, которую пропускает оптическая система [14] (рис. 1):

$$f'_{\max} = \frac{2NA}{\beta\lambda}; \tag{3}$$

$H_D(f_X', f_Y')$ — передаточная функция цифровой камеры, которая содержит двухмерную пространственную структуру фоточувствительных элементов прямоугольной формы [12, с. 104]:

$$H_D(f_X', f_Y') = \frac{\sin(\pi X_E f_X')}{\pi X_E f_X'} \cdot \frac{\sin(\pi Y_E f_Y')}{\pi Y_E f_Y'}; \tag{4}$$

X_E, Y_E — размеры фоточувствительного элемента цифровой камеры [13];

$H_F(f_X', f_Y')$ — передаточная функция линейного цифрового фильтра высоких пространственных частот.

В том случае, когда фильтр имеет окно размерами w_X, w_Y и матрицу коэффициентов $a_{i,j}$, его передаточная функция запишется в следующем виде [15]:

$$\begin{aligned}
 H_F(f_X', f_Y', w_X, w_Y) &= \sum_{j=-\frac{w_Y-1}{2}}^{\frac{w_Y-1}{2}} \sum_{i=-\frac{w_X-1}{2}}^{\frac{w_X-1}{2}} (a_{i,j} \cdot \exp(-2\pi i f_X' X_P - 2\pi j f_Y' Y_P)) = \\
 &= \sum_{j=-\frac{w_Y-1}{2}}^{\frac{w_Y-1}{2}} \sum_{i=-\frac{w_X-1}{2}}^{\frac{w_X-1}{2}} (a_{i,j} \cdot \exp(-2\pi i f_X' X_P) \cdot \exp(-2\pi j f_Y' Y_P)), \tag{5}
 \end{aligned}$$

где X_P, Y_P — пространственные периоды фоточувствительных элементов цифровой камеры [12, 13].

Рассмотрим *градиентный* линейный цифровой фильтр высоких пространственных частот с матрицей коэффициентов следующего вида [7]:

$$a_{i,j} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \tag{6}$$

Передаточные функции подобных фильтров могут быть получены подстановкой матрицы коэффициентов (6) в выражение (5), и после ряда преобразований они запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 H_F(f_X', f_Y', w_X, w_Y) &= \exp\left(2\pi \frac{w_X-1}{2} f_X' X_P\right) \cdot \exp(0) - \\
 &- \exp\left(-2\pi \frac{w_X-1}{2} f_X' X_P\right) \cdot \exp(0) + \\
 &+ \exp(0) \cdot \exp\left(2\pi \frac{w_Y-1}{2} f_Y' Y_P\right) - \exp(0) \cdot \exp\left(-2\pi \frac{w_Y-1}{2} f_Y' Y_P\right) + \\
 &+ \exp\left(2\pi \frac{w_X-1}{2} f_X' X_P\right) \cdot \exp\left(2\pi \frac{w_Y-1}{2} f_Y' Y_P\right) - \\
 &- \exp\left(-2\pi \frac{w_X-1}{2} f_X' X_P\right) \cdot \exp\left(2\pi \frac{w_Y-1}{2} f_Y' Y_P\right) + \\
 &+ \exp\left(2\pi \frac{w_X-1}{2} f_X' X_P\right) \cdot \exp\left(-2\pi \frac{w_Y-1}{2} f_Y' Y_P\right) - \\
 &- \exp\left(-2\pi \frac{w_X-1}{2} f_X' X_P\right) \cdot \exp\left(-2\pi \frac{w_Y-1}{2} f_Y' Y_P\right) = \\
 &= 2 \cdot \sin(\pi(w_X-1)f_X' X_P) + 4 \cdot \sin(\pi(w_X-1)f_X' X_P) \times \\
 &\times \cos(\pi(w_X-1)f_Y' Y_P) = 4 \cdot \sin(\pi(w_X-1)f_X' X_P) \times \\
 &\times (0,5 + \cos(\pi(w_Y-1)f_Y' Y_P)). \tag{7}
 \end{aligned}$$

Аналогичное выражение можно получить для другого варианта градиентного линейного цифрового фильтра высоких пространственных частот:

$$a_{i,j} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Передаточные функции таких фильтров (8) будут иметь следующий вид:

$$H_F(f_X', f_Y', w_X, w_Y) = 4 \cdot \sin(\pi(w_Y - 1)f_Y'Y_P) \times (0,5 + \cos(\pi(w_X - 1)f_X'X_P)). \quad (9)$$

В случае *симметричного* линейного цифрового фильтра высоких пространственных частот матрица коэффициентов имеет вид [15]

$$a_{i,j} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 8 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

Передаточная функция симметричных цифровых фильтров также может быть получена подстановкой матрицы коэффициентов (10) в выражение (5). Она примет следующий вид:

$$\begin{aligned} H_F(f_X', f_Y', w_X, w_Y) &= 8 \cdot \exp(0) \cdot \exp(0) - \\ &- \exp\left(2\pi \frac{w_X - 1}{2} f_X'X_P\right) \cdot \exp(0) - \exp\left(-2\pi \frac{w_X - 1}{2} f_X'X_P\right) \cdot \exp(0) - \\ &- \exp\left(2\pi \frac{w_Y - 1}{2} f_Y'Y_P\right) \cdot \exp(0) - \exp\left(-2\pi \frac{w_Y - 1}{2} f_Y'Y_P\right) \cdot \exp(0) - \\ &- \exp\left(2\pi \frac{w_X - 1}{2} f_X'X_P\right) \cdot \exp\left(2\pi \frac{w_Y - 1}{2} f_Y'Y_P\right) - \\ &- \exp\left(-2\pi \frac{w_X - 1}{2} f_X'X_P\right) \cdot \exp\left(2\pi \frac{w_Y - 1}{2} f_Y'Y_P\right) - \\ &- \exp\left(2\pi \frac{w_X - 1}{2} f_X'X_P\right) \cdot \exp\left(-2\pi \frac{w_Y - 1}{2} f_Y'Y_P\right) - \\ &- \exp\left(-2\pi \frac{w_X - 1}{2} f_X'X_P\right) \cdot \exp\left(-2\pi \frac{w_Y - 1}{2} f_Y'Y_P\right) = \\ &= 8 - 2(\cos(\pi(w_X - 1)f_X'X_P) + \cos(\pi(w_Y - 1)f_Y'Y_P)) - \\ &- 4(\cos(\pi(w_X - 1)f_X'X_P) \cdot \cos(\pi(w_Y - 1)f_Y'Y_P)). \quad (11) \end{aligned}$$

$H_R(f_X', f_Y')$ — передаточная функция интерполятора двухмерного сигнала. Интерполятор позволяет по отсчетам цифрового сигнала выполнить аналоговую или цифровую интерполяцию и вычислить значения, находящиеся между дискретными отсчетами цифрового изображения. Его передаточная функция имеет вид [12, p. 87]:

$$H_R(f_X', f_Y') = \begin{cases} 1, |f_X'| < \frac{1}{2X_P}, |f_Y'| < \frac{1}{2Y_P}; \\ 0, |f_X'| \geq \frac{1}{2X_P}, |f_Y'| \geq \frac{1}{2Y_P}. \end{cases} \quad (12)$$

Используя математический аппарат (1)–(12), задачу оптимизации цифрового фильтра высоких пространственных частот для оценивания можно сформулировать следующим образом: требуется найти такие параметры цифрового фильтра (размеры окна и коэффициенты) (11), при которых отношение сигнал/шум в принятой формулировке достигло бы максимального значения для заданных пользователем значений остальных параметров микроскопа:

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{\sqrt{\int_{\frac{0,5}{X_P}}^{\frac{0,5}{X_P} + \frac{0,5}{Y_P}} \int_{\frac{0,5}{Y_P}}^{\frac{0,5}{Y_P} + \frac{0,5}{X_P}} U^2(f_X', f_Y', p, z, w_X, w_Y) df_X' df_Y'}}{\sqrt{\int_{\frac{0,5}{X_P}}^{\frac{0,5}{X_P} + \frac{0,5}{Y_P}} \int_{\frac{0,5}{Y_P}}^{\frac{0,5}{Y_P} + \frac{0,5}{X_P}} G(f_X', f_Y', w_X, w_Y) df_X' df_Y'}} = \\ &= \mu(p, z, w_X, w_Y) \xrightarrow{w_X, w_Y} \max. \quad (13) \end{aligned}$$

Для решения поставленной задачи могут быть применены аналитические или численные методы поиска максимума [11].

Рассмотрим пример решения задачи оптимизации цифрового фильтра для типового микроскопа, параметры которого приведены в **таблице**. Для упрощения выполним все вычисления (1)–(13) для случая одномерного входного сигнала.

В качестве входного сигнала выбран оптический сигнал, который формирует тест-объект в виде штриховой миры [12]. Выбор такого тест-объекта обусловлен следующими причинами:

— согласно международным стандартам штриховые миры рекомендуется использовать для оценки качества оптических и оптико-электронных систем, включая микроскопы, которые формируют и обрабатывают изображения [12];

— распределение яркости и его пространственный спектр на поверхности такого тест-объекта могут быть описаны в аналитическом виде, что упрощает процесс компьютерного моделирования процесса формирования изображений с увеличенной глубиной РИП [12];

— характерные размеры наблюдаемых объектов могут быть легко привязаны к размеру штриха такого тест-объекта при оптимизации цифрового фильтра.

Результаты вычислений в виде графиков зависимости отношения сигнал/шум от размеров окна при различных расфокусировках и периодах шпальной миры приведены на **рис. 3**. Следует обратить внимание на характерную особенность этих зависимостей — наличие одного ярко выраженного глобального

СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ И ОБРАБОТКИ СИГНАЛА

максимума, который соответствует оптимальному размеру маски цифрового фильтра.

На рис. 4 представлены графики пространственных спектров сигналов и пространственных передаточных функций элементов цифрового оптического микроскопа для одномерного случая $f_y' = 0$, используемый фильтр высоких пространственных частот — симметричный (11), $p=3$ мкм, $z=0,34$ мкм. Как видно

из рис. 4, максимальное отношение сигнал/шум достигается только в том случае, если пространственный спектр информационной составляющей сигнала после цифровой камеры будет согласован с передаточной функцией цифрового фильтра.

На рис. 5 показаны цифровые изображения, полученные при помощи цифровой камеры, которая установлена на оптическом микроскопе. В качестве

Параметры цифрового оптического микроскопа

Наименование параметра	Значение параметра
Период тест-объекта — четырехшпальной миры	$p=0,3 \dots 3,0$ мкм
Числовая апертура микрообъектива	$NA=0,9$
Линейное увеличение оптической системы микроскопа	$\beta=100$
Рабочая длина волны	$\lambda=0,55$ мкм
Показатель преломления среды в пространстве предметов	$n=1,0$
Дифракционная глубина резко изображаемого пространства [1, с. 190]	$\Delta Z = \lambda n / (2NA^2) = 0,34$ мкм
Предел пространственной разрешающей способности оптической системы микроскопа [14, с. 148]	$d_{\min} = 0,61\lambda / NA = 0,3$ мкм
Максимальная пространственная частота в пространстве предметов оптической системы микроскопа [1, с. 205]	$f_{\max} = 2NA / \lambda = 3333$ линий/мм
Максимальная пространственная частота в пространстве изображений оптической системы микроскопа (3)	$f'_{\max} = 2NA / \beta\lambda = 33,33$ линий/мм
Размеры фоточувствительного элемента	$x_E = y_E = 6,7$ мкм
Пространственный период фоточувствительного элемента	$x_p = y_p = 7,4$ мкм
Диапазон размеров окна исследуемых цифровых фильтров	$w_x \times w_y = 3 \times 3 \dots 50 \times 50$
Вид маски градиентного цифрового фильтра размерами 3×3	1 0 -1 1 1 1
	1 0 -1 0 0 0
	1 0 -1 -1 -1 -1
Вид маски симметричного цифрового фильтра размерами 3×3	-1 -1 -1
	-1 8 -1
	-1 -1 -1

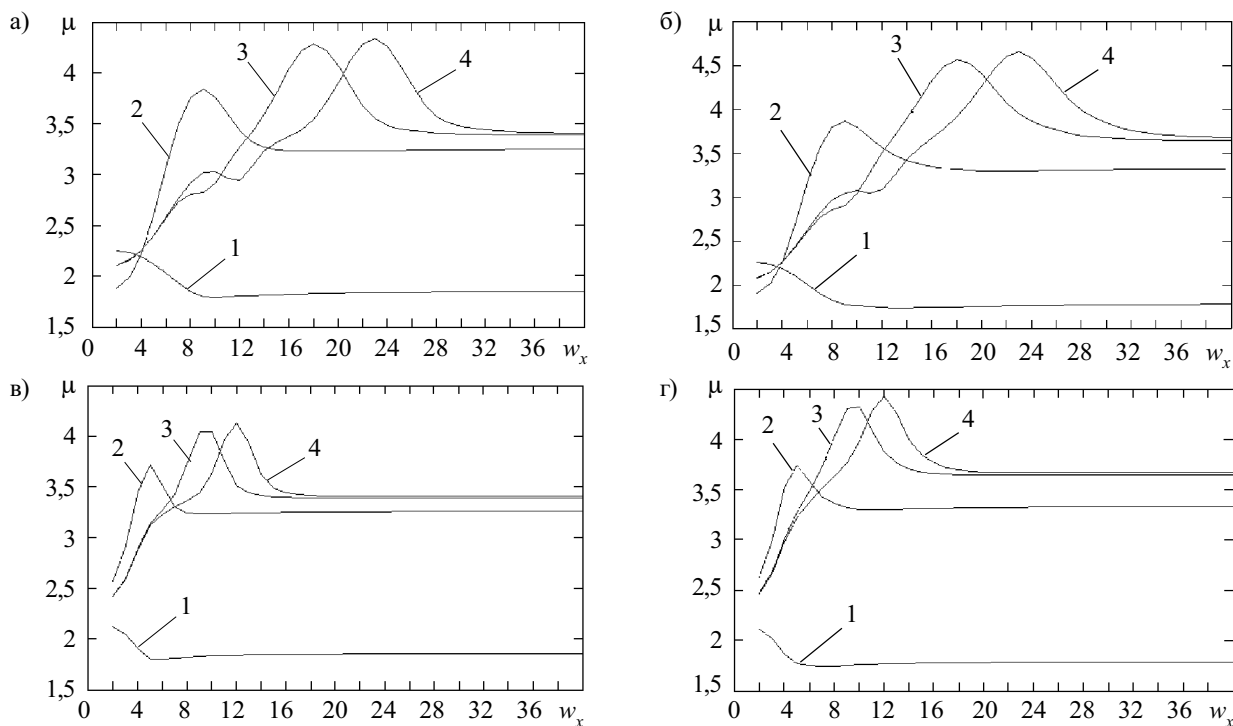


Рис. 3. Зависимость отношения сигнал/шум от размера маски при различных периодах штриховой миры (1 — 0,3 мкм; 2 — 1 мкм; 3 — 2,4 мкм; 4 — 3 мкм):

a — симметричный цифровой фильтр, расфокусировка $0,034$ мкм $= 0,1\Delta Z$; *б* — расфокусировка $0,34$ мкм $= \Delta Z$; *в* — градиентный цифровой фильтр, расфокусировка $0,034$ мкм $= 0,1\Delta Z$; *г* — расфокусировка $0,34$ мкм $= \Delta Z$

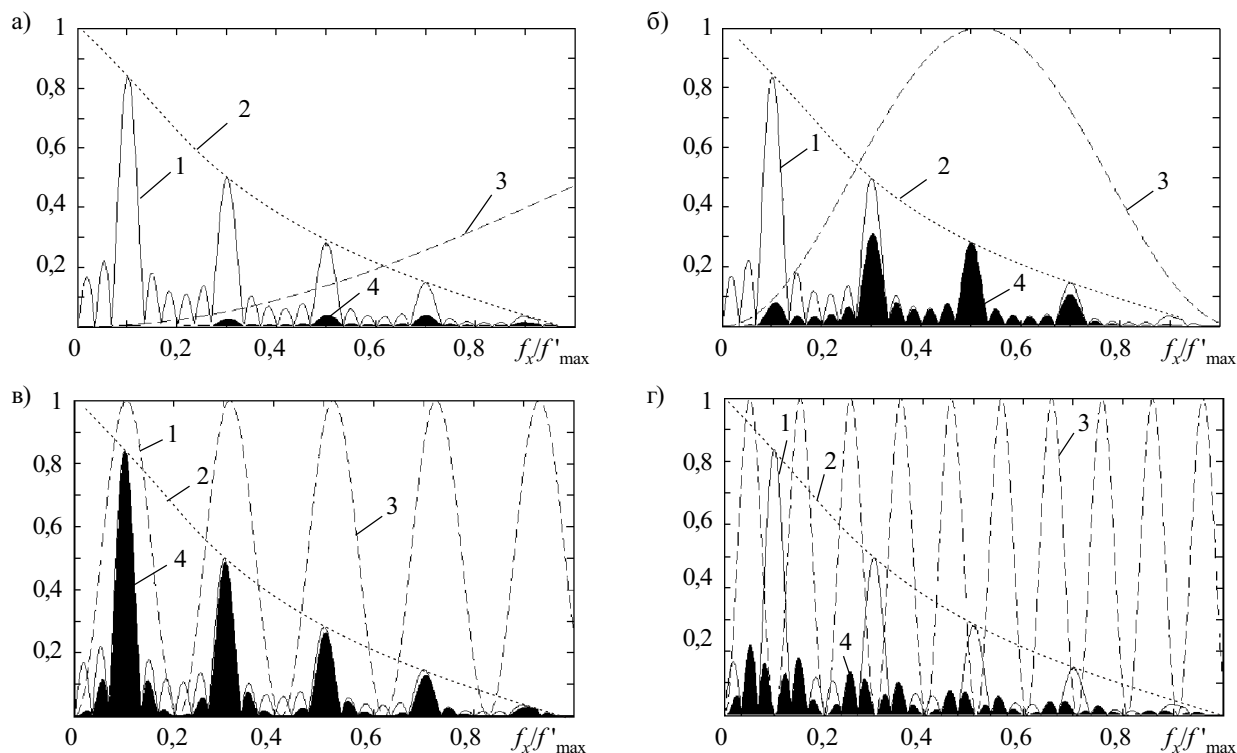


Рис. 4. Нормированные графики пространственных спектров сигналов и пространственных передаточных функций элементов цифрового оптического микроскопа:

a — $w_X=3$; $б$ — $w_X=5$ [7]; $в$ — $w_X=21$ (13); $г$ — $w_X=43$; 1 — $L(\beta f'_X, p)$; 2 — $H_0(f'_X) H_D(f'_X)$; 3 — $H_F(f'_X, w_X)$; 4 — $U(f'_X, p, z, w_X)$

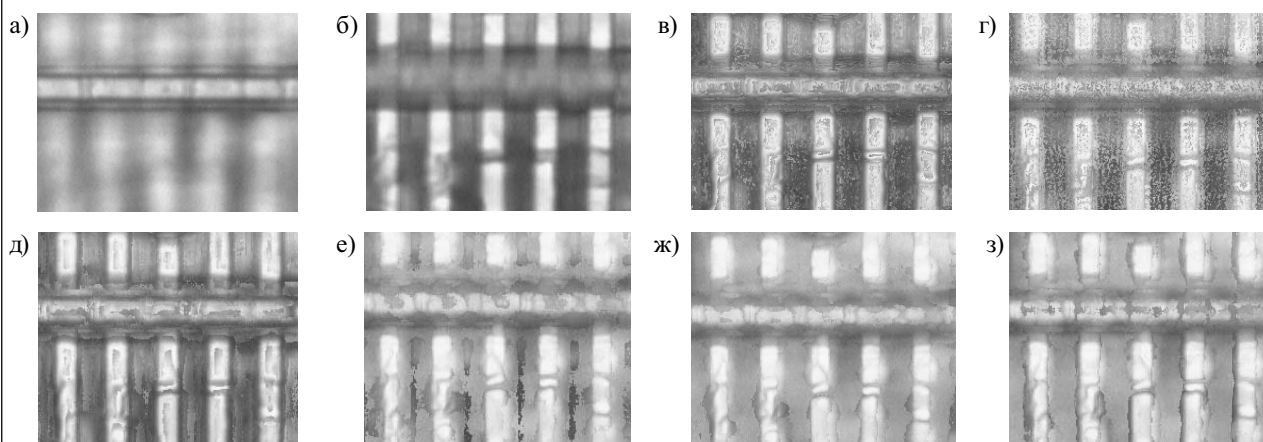


Рис. 5. Цифровые изображения многослойного тест-объекта, полученные при помощи цифрового микроскопа (ширина штриха 1,5 мкм, что соответствует 21–22 пикселям в цифровом изображении):

a — фокусировка на верхний слой; $б$ — фокусировка на нижний слой; $в$ – $з$ — изображения с увеличенной глубиной РИП; $в$ — маска 3×3 ; $г$ — маска 11×11 ; $д$ — маска 5×5 [7]; $е$ — маска 21×21 (13); $ж$ — маска 35×35 ; $з$ — маска 51×51

наблюдаемого объекта использовался аналог штриховой миры, содержащий штрихи, разнесенные по высоте (рис. 5, a , $б$). Это позволило визуально проанализировать особенности изображений с увеличенной глубиной РИП, которые получены при различных размерах маски цифрового фильтра.

Анализ полученных результатов показывает:

1. Оптимальный размер окна цифрового фильтра прямо пропорционален характерному размеру наблюдаемого объекта, в данном случае — периоду шпальной миры p . Приближенное значение размера окна симметричного фильтра (10) может быть рассчитано как половина изображения периода шпальной миры

с добавлением размера пятна рассеяния, которые выражены числом пикселей (см. табл.):

$$w_X \approx \frac{\beta}{2X_P} (p + d_{\min}) = \frac{\beta}{2X_P} \left(p + 0,61 \frac{\lambda}{NA} \right);$$

$$w_Y \approx \frac{\beta}{2Y_P} (p + d_{\min}) = \frac{\beta}{2Y_P} \left(p + 0,61 \frac{\lambda}{NA} \right). \quad (14)$$

Эти соотношения отражают сущность согласованной пространственной фильтрации — наилучший цифровой фильтр может быть получен в том случае, когда пространственный спектр полезного сигнала и передаточная функция микроскопа согласованы друг с

другом. Этот факт подтверждается экспериментально: наилучшее качество цифровых изображений достигается только в том случае, когда размер маски цифрового фильтра приблизительно равен ширине изображения штриха в пикселах (рис. 5, *е*). Если размеры маски существенно больше ширины штриха, то качество цифрового изображения снижается из-за снижения контраста и четкости (рис. 5, *ж*, *з*). В противном случае, когда размеры маски существенно меньше ширины штриха, усиливается высокочастотная составляющая шума — видны мелкие детали и шумовая составляющая, которые не информативны для автоматической обработки изображений (рис. 5, *в*, *г*).

Следует отметить, что методика оптимизации цифрового фильтра (1)—(13) основана на объективном показателе качества цифрового изображения (13) и предназначена для систем автоматической регистрации и обработки цифровых изображений на автоматизированных микроскопах [11, 12]. В этом случае максимизация отношения сигнал/шум в обобщенном виде (13) целесообразна [11]. При визуальном анализе изображений, безусловно, требуется учитывать особенности зрительного восприятия человека [16]. Так, зрительная система лучше распознает четкие объекты при наличии высокочастотного пространственного шума, чем менее четкие объекты при низком уровне шумов (рис. 5, *в*, *г*). Поэтому при увеличении глубины РИП в изображениях для визуального анализа размеры маски цифрового фильтра должны быть уменьшены по сравнению со значениями, рассчитанными по предложенной методике (1)—(13) (рис. 5, *д*, *е*).

2. Оптимальный размер окна цифрового фильтра изменяется в малых пределах при больших изменениях расфокусировки (рис. 3, 4). Таким образом, оптимальный размер маски мало чувствителен к малым и средним расфокусировкам, когда размер изображения объекта остается существенно больше размеров пятна рассеяния.

3. Симметричный и градиентный цифровые фильтры имеют подобные зависимости отношения сигнал/шум от размеров окна. При этом оптимальный размер окна градиентного фильтра в два раза меньше оптимального размера окна симметричного фильтра (рис. 3, 4). Видимо, симметричный цифровой фильтр можно рассматривать как совокупность двух повернутых градиентных фильтров (8)—(11).

4. Полученные результаты полностью согласуются с результатами из работы [7]. В этой работе рекомендуется использовать окна типа $(1, 0, -1)$ вместо окон $(1, -1)$ для того чтобы согласовать пространственный спектр полезного сигнала с передаточной функцией микроскопа. Это справедливо, если характерный размер наблюдаемого объекта приближается к пределу пространственного разрешения микроскопа [1]. В других случаях, когда наблюдаемые объекты существенно больше предела пространственного разрешения микроскопа, следование этим рекомендациям приведет к ухудшению работы алгоритма цифрового увеличения глубины РИП (рис. 3, 4, 5, *г*). Поэтому можно утверждать, что в работе [7] рассмотрен частный случай методики оптимизации цифрового фильтра для увеличения глубины РИП (1)—(13).

В заключение следует подчеркнуть практическую ценность предложенной методики. В большинстве известных публикаций [6, 8—10], за исключением работы [7], вопросы оптимизации цифровых фильтров не исследовались детально. В программное обеспечение для цифрового увеличения глубины РИП закладываются наиболее распространенные цифровые фильтры высоких пространственных частот — фильтр Собеля 3×3 или 5×5 , симметричный фильтр 3×3 или 5×5 [6—10]. Вместе с тем на практике априорная информация о наблюдаемых объектах известна или может быть получена с малыми затратами времени и средств. В этих условиях пользователь микроскопа с цифровой камерой, который знает параметры своего микроскопа, всегда может рассчитать оптимальный размер окна цифрового фильтра для получения наиболее достоверного показателя фокусировки (14). Это позволит ему получать наиболее качественные изображения с увеличенной глубиной резко изображаемого пространства, которые будут иметь минимальный уровень шумов и минимальное количество ошибок выделения сфокусированных фрагментов.

Выводы

1. Предложена методика оптимизации цифрового фильтра в цифровом оптическом микроскопе при формировании изображений с увеличенной глубиной резко изображаемого пространства. Эта методика учитывает размерные характеристики наблюдаемого объекта, параметры и характеристики оптической системы, цифровой камеры и цифрового фильтра. Методика позволяет вычислить оптимальный размер окна цифровых фильтров высоких пространственных частот, при помощи которого оценивается фокусировка отдельных пикселей изображения.

2. Оптимальный размер окна цифрового фильтра приблизительно равен сумме минимального размера изображения фрагмента наблюдаемого объекта и размера пятна рассеяния в пикселах. Это отражает тот факт, что для получения наилучшего показателя фокусировки цифровой фильтр должен быть согласован с пространственным спектром наблюдаемого объекта.

3. Показано, что методика определения оптимального размера окна из работы [7] является частным случаем предложенной методики, которая более точно учитывает согласование пространственных спектров объекта произвольной формы и передаточной функции цифрового фильтра.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Михель К. Основы теории микроскопа. — М.: Машиностроение, 1955.
2. Glasbey C. A. Problems in digital microscopy / Proc. III International Biometric Conference. — Amsterdam, Holland. — 1996. — P. 183—200.
3. Niederost M., Niederost J., Scucka J. Automatic 3D reconstruction and visualization of microscopic objects from monoscopic multifocus image sequence / Proc. International Workshop on Visualization and Animation of Reality-based 3D Models. — Tarasp-Vulpera, Switzerland. — 2003. — P. 10—17.
4. Tang X., L'Hostis P., Xiao Y. An auto-focusing method in a microscopic testbed for optical discs // Journal of NIST. — 2000. — Vol. 105, N 4. — P. 565—569.

5. Краснополюсовский А. С., Скаковская А. М. Автофокусировка электронного микроскопа по изображению / Тр. конф. "УкрОбраз".— Киев, Украина.— 2000.— С. 183—186.

6. Goldsmith N. T. Deep focus: a digital image processing techniques to produce improved focal depth in light microscopy // Image Analysis and Stereology.— 2000.— N 19.— P. 163—167.

7. Boddeke F., Van Viet L., Netten H., Young I. Autofocusing in microscopy based on the OTF and sampling // Bioimaging.— 1994.— N 2.— P. 193—203.

8. NgKuang Chern N., Poo A., Marchelo H. Practical issues in pixel-based autofocusing for machine vision / Proc. IEEE International Conf. on Robotics and Automation, ICRA.— Seoul, Korea.— 2001.— P. 2791—2796.

9. Pech-Pacheco J., Cristobal G., Chamorro-Martinez J., Fernandez-Valdivia J. Diatom autofocusing in bright field microscopy / Proc. Int. Conf. Pattern Recognition.— Barcelona, Spain.— 2000.— P. 15—19.

10. Roca X., Binefa X., Vitria J. New autofocusing algorithm for cytological tissue in a microscope environment // Optical Engineering.— 1998.— N 37(2).— P. 635—641.

11. Шестов Н. С. Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех.— М.: Сов. радио, 1976.

12. Holst G. C. Sampling, aliasing, and data fidelity for electronic imaging systems, communications, and data acquisition.—Bellingham: SPIE Press, 1998.

13. Боровицкий В. Н. Выбор цифровой камеры для оптического микроскопа // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2004.— № 1.— С. 21—26.

14. Шильман М. Я. Автоматическая фокусировка оптических систем.— Л.: Машиностроение, 1990.

15. Шлюфер Е. Обработка сигналов: цифровая обработка дискретизированных сигналов.— Киев: Либидь, 1992.

16. Красильников Н. Н. Теория передачи и восприятия изображений.— М.: Радио и связь, 1986.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Яценков В. С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС.— М.: Горячая линия— Телеком, 2005.— 272 с.

Систематизирована информация о спутниковых навигационных системах GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. Изложена история разработки и создания систем, рассмотрены основные принципы их работы. Приведены характеристики и структура навигационных сигналов, данные о технических возможностях и параметрах действующих систем, даны определения основных понятий и терминов, перечислены наиболее познавательные ресурсы сети Интернет.

Книга предназначена для разработчиков и пользователей навигационных систем различного уровня подготовки, от любителей, эксплуатирующих приемники GPS в быту, до специалистов, использующих навигационные средства в повседневной работе.

Может быть полезна студентам радиотехнических специальностей и аспирантам.



НОВЫЕ КНИГИ

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

Изложены основы инженерных методов синтеза и расчета основных классов радиотехнических устройств с использованием пакета программ SystemView компании Elanix, который обеспечивает возможность всестороннего анализа свойств систем, включая алгоритмы аналоговой или цифровой обработки сигналов, синтеза фильтров, анализа и синтеза систем управления и систем связи, моделирования динамических систем на уровне функциональных блоков.

Книга содержит необходимый теоретический материал и значительное количество практических примеров. Особенностью книги является то, что изложение ведется от постановки конкретной радиотехнической задачи, а не от описания возможностей пакета.

Предназначена для разработчиков и специалистов, может быть полезна студентам радиотехнических специальностей.



НОВЫЕ КНИГИ

Петров Б. М. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебник.— М.: РадиоСофт, 2004.— 558 с.

Систематически и подробно рассмотрены основные уравнения и положения электродинамики, изучаются возбуждаемые электромагнитные (ЭМ) поля в неограниченном однородном пространстве, теория направляющих систем, граничные задачи о возбуждении или возможности существования ЭМ-волн в направляющих системах и в объемных резонаторах, явления рассеяния и дифракции волн, соответствующие прикладным задачам радиотехники; изложены основные положения геометрической оптики, понятия о нелинейных средах и о распространении ЭМ-волн в неоднородных и анизотропных средах; рассмотрено влияние поверхности Земли, тропосферы и ионосферы на распространение ЭМ-волн различных диапазонов. Особое внимание уделено физической интерпретации явлений электромагнетизма.

378 иллюстраций. Даны примеры расчетов и сформулированы 132 контрольных задачи. Для студентов радиотехнических специальностей.



А. Г. ЯЦУНЕНКО, В. М. КОВТОНЮК, В. Н. ИВАНОВ,
к. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО

Украина, г. Днепропетровск, Институт технической механики;
г. Киев, Научно-исследовательский институт "Орион"
E mail: anatoly @ ramed.dp.ua

Дата поступления в редакцию
01.03 2005 г.

Оппонент к. ф.-м. н. Ю. А. ЦВИРКО
(НИИ "Орион", г. Киев)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МЕДИЦИНЕ И ТРЕБОВАНИЯ К ПОСТРОЕНИЮ КВЧ-АППАРАТОВ

Развитие аппаратных средств для КВЧ-терапии идет по пути повышения информационной значимости КВЧ-сигналов и построения многоканальных аппаратов для профилактики и лечения.

Электромагнитное излучение (ЭМИ) крайне высокой частоты (КВЧ) низкой интенсивности находит все более широкое применение в медицине в качестве основного средства воздействия на организм человека при проведении профилактических и лечебных процедур. Из широкого диапазона электромагнитных волн, используемого в медицине, КВЧ-диапазон 30—300 ГГц (он соответствует длинам волн 10—1 мм) начал осваиваться практически недавно. Можно сказать, что КВЧ-терапия это то новое направление в медицине, которое непосредственным образом позволило связать теорию и технику сверхвысоких частот с новейшими знаниями в области биологии и биофизики и практически использовать их в лечебных целях.

Разработка первых серийных генераторов КВЧ-диапазона в 1965—1966 гг. стала техническим фундаментом для проведения активных исследований в области биологии, биофизики и медицины [1, 2]. Первое, на что обратили внимание исследователи, это то, что монохроматические излучения этого диапазона отсутствуют в окружающей природе. Они практически не проходят сквозь атмосферу и сильно поглощаются в воде и водных средах.

Любой живой организм является диссипативной системой (ДС), тесно связанной с окружающей средой и отличающейся от других ДС тем, что ее существование определяется не случайными потоками энергии из среды в систему, а их селективным отбором. Живые системы способны активно участвовать в выборе типа энергии, а также адаптироваться к тому виду энергии, которую они не в состоянии изменить или устранить. Исходя из этого была высказана и подтверждена гипотеза об особой роли ЭМИ КВЧ-диапазона в процессах жизнедеятельности биологических объектов [2, 3].

Второй привлекательной особенностью миллиметровых волн является то, что они относятся к неионизирующим излучениям. Граница между слабыми и сверхслабыми уровнями в миллиметровом диапазо-

не находится на уровне единиц мВт/см². Именно здесь формируется граница между энергетическим и информационным характером воздействия ЭМИ на живые организмы. Эти излучения не только не влияют на атомно-молекулярные структуры, но и не могут повлиять на колебательный спектр биомакромолекул. При взаимодействии с биомакромолекулами они могут влиять лишь на энергию вращения этих молекул. Энергия квантов этого диапазона, с одной стороны, меньше энергии теплового движения атомов и молекул, а с другой — много меньше энергии даже слабых водородных связей в живых организмах.

Отсутствие повреждающего действия на организм в совокупности с большой информационной емкостью подтверждает возможность использования ЭМИ рассматриваемых диапазонов для связи и управления внутри живых организмов, причем на очень низком уровне мощности управляющих сигналов. В исследованиях, проводившихся под общим научным руководством академика Девяткова Н. Д. [3], было показано, что КВЧ-излучение является естественным инструментом воздействия на организм с целью формирования ответной адаптационной реакции. Поступивший в живой организм КВЧ-сигнал определенной частоты может преобразовываться в клетке, при наличии какой-либо патологии, в сигнал другой частоты, оптимальный для восстановления нормального функционирования именно этой клетки. В результате этого единый КВЧ-сигнал, взаимодействуя одновременно со многими отклонившимися от оптимального функционирования клетками, превращается в совокупность различных сигналов, и восстановление организма становится комплексным. А поскольку управляющие системы всех клеток входят в единую управляющую систему организма и действуют в ней взаимосвязанно и взаимосогласованно, то описанный процесс восстановления оптимального функционирования является по существу процессом восстановления единой управляющей системы.

Именно это обстоятельство позволяет с помощью когерентных излучений малой интенсивности, генерируемых техническими устройствами, и с учетом индивидуальных особенностей живого организма оказать ему помощь в поддержании оптимального функционирования системы управления в периоды, когда она не в состоянии самостоятельно справиться с этой задачей.

В дальнейшем, на протяжении трех с половиной десятилетий, в ряде работ были открыты и сформулированы новые, специфические особенности воздействия ЭМИ КВЧ-диапазона на биологические объекты, описаны основные черты этой специфичности, а также предложены различные объяснения его взаимодействия с живыми организмами [3—6], в том числе:

— общность для всех организмов (от микроорганизмов до млекопитающих) основных закономерностей, возникающих при воздействии на них ЭМИ КВЧ, влияющих на некоторые универсальные процессы, регулирующие жизнедеятельность организмов;

— возникающие биологические эффекты не связаны ни с нагревом, ни с разрушением тканей;

— очень высокая для биологии и медицины воспроизводимость результатов;

— специфический лечебный характер, отмечаемый практически во всех публикациях, связанных с исследованиями применения ЭМИ КВЧ в медицине. При надлежащем выборе соответствующих заболеваний частот колебаний ЭМИ КВЧ могут активно влиять на больной организм до тех пор, пока он не восстановится;

— соответствующие биологические эффекты миллиметровых волн проявляются при изменении плотности потока мощности в широких пределах — от единиц пиковатт до единиц милливатт на квадратный сантиметр.

Однако с учетом того, что плотность потока мощности ЭМИ не должна превышать единиц милливатт на квадратный сантиметр, а диапазон изменения мощности ограничен (по верхнему пределу — тепловыми эффектами, проявляющимися при поглощении тканями ЭМИ, а по нижнему — чувствительностью энергоинформационной системы человеческого организма к ЭМИ и чувствительностью аппаратно-программных средств, обеспечивающих контроль и метрологическую поверку сверхслабых сигналов ЭМИ), динамический диапазон реально используемых сигналов может составить примерно 90 дБ, т. к. контролируемая в настоящее время (доступными техническими средствами) нижняя граница плотности потока мощности составляет $1 \cdot 10^{-15}$ Вт/см².

Все вышеизложенное позволило сформулировать общие требования к аппаратам для КВЧ-терапии:

а) частота сигналов ЭМИ должна соответствовать одной из резонансных частот биологической системы;

б) полоса частотной модуляции должна быть равна или больше полосы биологически активной резонансной частоты;

в) должна быть предусмотрена возможность как частотной, так и амплитудной модуляции ЭМИ;

г) облучение должно осуществляться в небольших (не более ± 100 МГц) полосах частот вокруг указанных фиксированных резонансных частот;

д) при проведении терапевтических сеансов должна быть обеспечена возможность воздействия на различные участки тела, зоны Захарьина–Геда, области крупных суставов и биологически активные точки (БАТ);

е) при создании аппаратов должна быть обеспечена многоканальность аппаратуры, позволяющая оказывать одновременное воздействие на несколько зон или БАТ.

Наиболее известными, разработанными в Украине и не имеющими аналогов в других странах, являются аппараты серии «РАМЕД-ЭКСПЕРТ», созданные в



Одноканальные многофункциональные аппараты РАМЕД ЭКСПЕРТ-01, -02, -03, -03Д

центре «Рамед», г. Днепропетровск (см. рисунок). В самых последних разработках аппаратов этой серии впервые была реализована возможность воздействия одновременно на шесть и более биологически активных точек. Все аппараты прошли клинические испытания и подтвердили свою высокую эффективность и надежность.

Выводы

Разработка новых аппаратов для КВЧ-терапии должна базироваться на тенденции предоставления врачу максимальной свободы выбора и возможностей позитивного регуляторного воздействия на динамику метаболических процессов организма пациента с учетом его общих и индивидуальных особенностей. Эта тенденция может быть успешно реализована путем влияния на сложную, многомерную структуру организма человека сигналом КВЧ с заданной и воспроизводимой пространственно-временной хорошо управляемой структурой и соответствующего контроля за ходом лечения.

В дальнейшем необходимо на базе уже проведенных исследований и существующих аппаратов для КВЧ-терапии сосредоточиться на разработке новых специализированных аппаратно-программных средств и конкретных медицинских методик их эффективного использования. Иначе говоря, необходимо создать принципиально новые медицинские технологии с использованием электромагнитных волн КВЧ-диапазона, интегрировать их в существующие методики и технологии для профилактики и лечения и, кроме того, адаптировать их для применения в новых, специфических условиях.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Базанова Э. Б., Брюхова А. К., Виленская Р. Л. и др. Некоторые вопросы методики и результаты экспериментального исследования воздействий СВЧ на микроорганизмы и животных // Успехи физических наук.— 1973.— Т. 110, вып. 3.— С. 381—392.
2. Голант М. Б., Брюхова А. К., Двадцатова Е. А. и др. Возможность регулирования жизнедеятельности микроорганизмов при воздействии на них электромагнитных колебаний миллиметрового диапазона / В кн.: Эффекты нетеплового воздействия миллиметрового излучения на биологические объекты / Под ред. Н. Д. Девяткова.— М.: ИРЭ АН СССР, 1983.— С. 115—122.
3. Девятков Н. Д., Голант М. Б., Бецкий О. В. Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности.— М.: Радио и связь, 1991.
4. Голант М. Б. Влияние монохроматических излучений миллиметрового диапазона малой мощности на биологические процессы // Биофизика.— 1986.— Т. 31, вып. 1.— С. 139—147.
5. Чуян Е. Н., Темуриянц Н. А., Московчук О. Б. и др. Физиологические механизмы биологических эффектов низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ.— Симферополь: ЧП "Эльиньо", 2003.
6. Чуян Е. Н., Темуриянц Н. А., Пономарева В. П., Чирский Н. В. Физиологические асимметрии у человека и животных: влияние низкоинтенсивного электромагнитного излучения миллиметрового диапазона.— Симферополь: ЧП "Эльиньо", 2004.

И. А. ИВАНЧЕНКО, Л. М. БУДИЯНСКАЯ, д. ф.-м. н. Ю. Ф. ВАКСМАН

Украина, Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова
E-mail: oguint@paco.net

Дата поступления в редакцию
29.10 2004 г. — 16.03 2005 г.

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

ДВУХВОЛНОВОЙ СЕНСОР ДИСТАНЦИОННОЙ СЕЛЕКЦИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Разработанный сенсор основан на активном методе дистанционного распознавания поверхностей по коэффициенту отражения, который позволяет уменьшить погрешность дальномерных измерений.

Работа приборов распознавания, дальномерных устройств и измерителей скорости основана на принципе дистанционного определения отражательных свойств поверхности объекта. Применение пассивных методов измерений, связанных с анализом собственного излучения поверхности или отраженного ею солнечного излучения, ограничено из-за сложной статистической зависимости этих видов излучений от сезонных условий [1]. Для упрощения определения отражательных свойств поверхности в данной работе предлагается измерять не интегральный, а спектральный коэффициент отражения.

Анализ статистических данных о спектральном коэффициенте отражения некоторых естественных поверхностей [2, с. 211] показал следующее. По отражательным свойствам в диапазоне значений длины волны 0,5...1,0 мкм можно выделить два типа поверхностей: тип I — поверхности с малым значением коэффициента отражения, возрастающим в длинноволновой области; тип II — поверхности с большим значением коэффициента отражения, спадающим в ИК-области спектра. (Большинство почв, дорожных покрытий и растительных покровов относится к первому типу.) Диапазон изменения коэффициента отражения по абсолютной величине у поверхностей типа I составляет 5...35%, у поверхностей типа II — 80...55%.

Обнаруженные особенности спектральной зависимости коэффициента отражения легли в основу активного спектрального метода определения типа поверхности. Суть метода состоит в измерении коэффициента отражения в различных спектральных диапазонах при зондировании поверхности двумя (или более) световыми потоками определенной длины волны и равной мощности.

Критерием выбора спектральных диапазонов служит величина среднего яркостного контраста K_L , определяемого как

$$K_L(\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2) = L_{ni}(\Delta\lambda_1) - L_{ni}(\Delta\lambda_2), \quad (1)$$

где $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2$ — спектральные диапазоны;

L_{ni} — средняя яркость поверхности i -го типа.

Учитывая, что большинство естественных поверхностей является диффузными ламбертовыми отражателями, их яркость при активном зондировании световым потоком определенного спектрального диапазона выражается как [3, с. 89]

$$L_{ni}(\Delta\lambda) = \rho_{\Delta\lambda} E_{\Delta\lambda} / \pi, \quad (2)$$

где $\rho_{\Delta\lambda}$ — коэффициент отражения поверхности;

$E_{\Delta\lambda}$ — освещенность поверхности, создаваемая излучателем с яркостью L_0 и определяемая дальностью l .

Исходя из условия равенства мощности исследуемых энергетических потоков разной длины волны при проведении спектрального анализа, можем записать:

$$E_{\Delta\lambda} = E = \text{const}. \quad (3)$$

С учетом (3) выражение (2) приобретает вид

$$L_{ni}(\Delta\lambda) = C_1 \rho_{\Delta\lambda}, \quad (4)$$

где $C_1 = E / \pi$.

Следовательно, в определенном спектральном диапазоне яркость поверхности определяется ее спектральным коэффициентом отражения.

Подставив (4) в (1), получим:

$$K_L(\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2) = C_1(\rho_{\Delta\lambda_1} - \rho_{\Delta\lambda_2}), \quad (5)$$

где $\rho_{\Delta\lambda_1}, \rho_{\Delta\lambda_2}$ — коэффициенты отражения поверхности для спектральных диапазонов $\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$, соответственно.

В таблице для ряда естественных поверхностей приведены значения яркости L_n и яркостного контраста K_L , полученные исходя из усредненных значений спектрального коэффициента отражения [2, с. 211] в четырех спектральных диапазонах $\Delta\lambda$.

В областях спектра с наибольшей разностью коэффициентов отражения максимальные значения K_L соответствуют спектральным диапазонам 0,6...0,7 и 0,9...1,0 мкм [4], которым и следует отдавать предпочтение при выборе спектральных диапазонов для измерений.

Предлагается сенсор, основанный на двухволновом методе автоматического бесконтактного измерения коэффициента отражения естественных природных образований [5].

Блок-схема сенсора показана на рис. 1. Она содержит излучатели 1 и 2, генерирующие излучение в выбранных спектральных диапазонах на исследуемую

Значения L_n и K_L для различных поверхностей

Поверхность	L_n , отн. ед.				K_L , отн. ед.			
	L_1 ($\Delta\lambda=0,5\dots0,6$ мкм)	L_2 ($\Delta\lambda=0,6\dots0,7$ мкм)	L_3 ($\Delta\lambda=0,8\dots0,9$ мкм)	L_4 ($\Delta\lambda=0,9\dots1,0$ мкм)	L_1-L_3	L_1-L_4	L_2-L_3	L_2-L_4
Снег с ледяной коркой	81,5	81,5	74,0	69,0	7,5	12,5	7,5	12,5
Снег влажный	73,0	72,5	63,0	55,5	10,0	18,5	9,5	17,5
Почва влажная	5,0	8,0	17,5	19,0	-12,5	-14,0	-9,5	-11,5
Кукуруза силосная	5,5	4,0	32,0	34,5	-26,5	-29,0	-28,0	-30,5
Кукуруза зеленая	7,0	6,0	28,0	29,5	-21,0	-22,5	-22,0	-23,5
Кукуруза желтая	11,5	14,0	23,0	27,5	-11,5	-16,0	-9,0	-13,5
Суданка	4,0	3,0	50,0	50,5	-46,0	-46,5	-47,0	-47,5
Чернозем	4,5	6,0	10,0	11,5	-5,5	-7,0	-4,0	-5,5
Стерня злаков	10,0	15,5	28,5	32,0	-18,5	-22,0	-13,0	-16,5

поверхность 3. Отраженное поверхностью 3 излучение поступает на вход фотоприемника 4, режим работы которого предусматривает последовательную временную синхронизацию с излучателями 1 и 2.

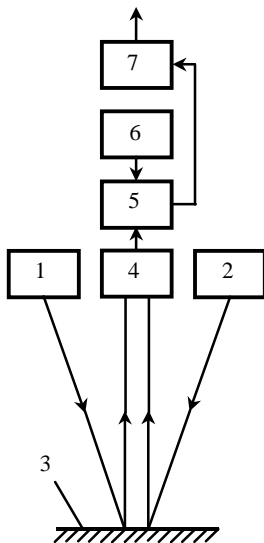


Рис. 1. Блок-схема двухволнового сенсора

Выходной сигнал фотоприемника 4 подается на вход схемы сравнения 5. На второй вход схемы сравнения 5 подается сигнал из схемы опорного уровня 6, который соответствует сигналу, отраженному эталонной поверхностью с отражательными свойствами, промежуточными между двумя выделенными типами. В схеме сравнения 5 производится накопление двух последовательных импульсов, полученных в результате приема двух отраженных потоков различного спектрального состава, и сравнение с опорным уровнем. Выход схемы сравнения 5 соединен с входом схемы идентификации вида поверхности 7.

В экспериментальном макете сенсора в качестве излучателей использовались газовый лазер ЛГ-126 и светодиод АЛ106 с длиной волны излучения 0,63 и 0,95 мкм, соответственно. Фотоприем обеспечивался фотодиодом ФД 155К с областью спектральной чувствительности 0,4...1,1 мкм. Измерительная база между активными элементами составляла 75 мм при дальности настройки 75 см.

Графические зависимости выходного сигнала $U_{фп}$ фотоприемного устройства от расстояния l до исследуемой поверхности показаны на рис. 2. Кривые 1 и 4 получены при зондировании поверхностей лазерным лучом, 2 и 3 — излучением светодиода. Отражению от поверхности типа I с интегральным коэффициентом отражения $\rho=0,30$ соответствуют кривые 3 и 4, а от поверхности типа II с $\rho=0,85$ — кривые 1 и 2.

Амплитуда входного сигнала фотоприемника зависит от расстояния до поверхности в соответствии с основным энергетическим уравнением измерителя [3, с. 90]:

$$\Phi_{вх} = \tau_o \tau_c^{2l} L_{\Delta\lambda} A_2 A_{вх} / l^2,$$

где $\Phi_{вх}$ — световой поток на входе фотоприемника;
 τ_o, τ_c — коэффициенты пропускания оптических систем и среды распространения излучения, соответственно;
 $A_2, A_{вх}$ — площади видимой части отражающей поверхности и входного зрачка фотоприемника, соответственно.

На фиксированном расстоянии при неизменных характеристиках оптических систем и внешней среды, т. е. если

$$\tau_o \tau_c^{2l} A_2 A_{вх} / l^2 = \text{const} = C_2,$$

световой поток

$$\Phi_{вх} = C_2 L_{\Delta\lambda}. \quad (6)$$

Амплитуда выходного напряжения $U_{фп}$ фотоприемника с учетом его интегральной чувствительности S и соотношения (6) выражается как

$$U_{фп} = S \Phi_{вх} = S C_2 L_{\Delta\lambda}. \quad (7)$$

Подставив (4) в (7), получим:

$$U_{фп} = S C_1 C_2 \rho_{\Delta\lambda}. \quad (8)$$

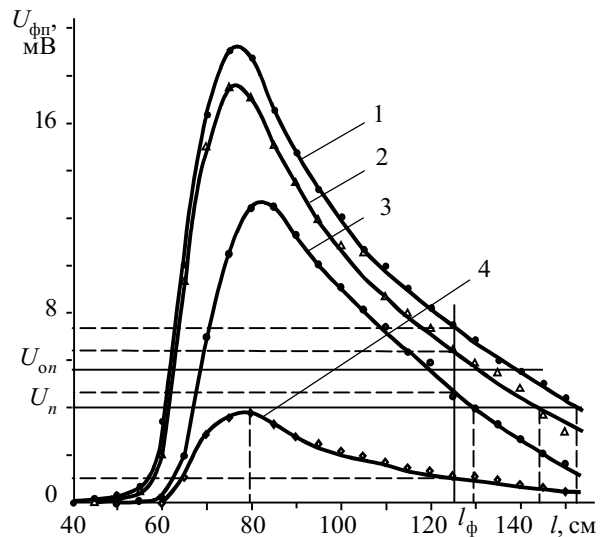


Рис. 2. Дистанционные характеристики двухволнового сенсора

Следовательно, $U_{\text{фп}}$ на определенной длине волны входного светового потока может быть выражена в единицах спектрального коэффициента отражения.

Определяя $\rho_{\Delta\lambda}$ из (8) и подставляя его в (5), получим:

$$K_L(\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2) = \frac{1}{C_2 S} [U_{\text{фп}}(\Delta\lambda_1) - U_{\text{фп}}(\Delta\lambda_2)]. \quad (9)$$

Соотношение (9) показывает, что в данной измерительной системе яркостный контраст поверхности в двух спектральных диапазонах эквивалентен разности амплитуд напряжения фотодиода. При этом знак разности амплитуд напряжения определяет тип поверхности, а величина служит мерой отражательных способностей.

В статических измерительных системах при фиксированной дальности $l_{\text{ф}}$ (рис. 2) у поверхностей типа I имеет место преобладание амплитуды отраженного ИК-излучения (0,9...1,0 мкм) над амплитудой отраженного видимого излучения (0,6...0,7 мкм) ($K_L < 0$), а у поверхностей типа II — наоборот ($K_L > 0$).

Очевидно, что каждой поверхности в зависимости от ее отражательных свойств соответствует определенное соотношение амплитуды фотоответа в различных спектральных диапазонах относительно друг друга и опорного уровня $U_{\text{он}}$. Это позволяет осуществлять селекцию поверхностей по величине соотношения и его знаку, решая задачу дистанционного распознавания объектов.

В динамических условиях сближения с исследуемой поверхностью опережение порогового сигнала U_n в канале видимого излучения $\{l_{U_n}(\Delta\lambda_1) > l_{U_n}(\Delta\lambda_2)\}$

соответствует поверхности с большим коэффициентом отражения (тип II), а опережение сигнала в канале ИК-излучения $\{l_{U_n}(\Delta\lambda_2) > l_{U_n}(\Delta\lambda_1)\}$ — поверхности с меньшим коэффициентом отражения (тип I). В дальномерных устройствах и измерителях скорости установленное соответствие между пороговой дальностью l_n и длиной волны λ зондирующего излучения позволяет избежать погрешности измерений, обусловленной разбросом коэффициента отражения поверхности объекта, а значит, и повысить точность дальномерных измерений.

Таким образом, предлагаемый метод селекции естественных поверхностей позволяет упростить определение свойств отражательной поверхности и уменьшить погрешность дальномерных измерений.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Альbedo и угловые характеристики отражения подстилающей поверхности и облаков / Под ред. К. Я. Кондратьева.— Л.: Гидрометеиздат, 1981.
2. Радиационные характеристики атмосферы и земной поверхности / Под ред. К. Я. Кондратьева.— Л.: Гидрометеиздат, 1969.
3. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов.— М.: Сов. радио, 1980.
4. Черешанский В. А., Иванченко И. А. Двухволновый экспресс-метод распознавания подстилающей поверхности // Тез. докл. Всесоюз. конф. «Дистанционное зондирование агропочвенных и водных ресурсов».— Барнаул.— 1990.— С. 137—139.
5. А. с. 1733979 СССР. Способ определения вида естественной подстилающей поверхности / В. А. Черешанский, И. А. Иванченко.— 1992.— Бюл. № 18.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Тихонов В. И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем.— М.: РадиоСофт, 2004.— 608 с.

Приводятся необходимые сведения из теории вероятностей и на их основе рассматриваются статистические методы анализа линейных систем и нелинейных радиотехнических устройств. На единой базе теории фильтрации экономно и единообразно изложены современные методы синтеза аналоговых и цифровых радиотехнических систем различного назначения, включая и адаптивные. Методика применения теоретических результатов к решению практических задач проиллюстрирована содержательными примерами.

Для студентов радиотехнических специальностей вузов и специалистов.

НОВЫЕ КНИГИ



Верба В. С., Битюков В. К., Нефедов В. И. и др. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах: Учебник.— М.: Высшая школа, 2004.— 28 л.

Рассмотрены вопросы метрологии, методы и средства измерений электрических величин, а также аспекты стандартизации изделий радиоэлектроники. Материал представлен с учетом современных достижений и тенденций развития теории измерений и измерительной техники. Изложение базируется на действующей нормативно-технической документации и рекомендациях международных организаций в области метрологии и стандартизации.

Второе издание дополнено разделами по метрологическому обеспечению защищенных телекоммуникационных систем, принципам построения современных средств измерений и измерению параметров телекоммуникационных сигналов. Существенно переработаны разделы по теории погрешностей и точности измерений.

К. т. н. В. Г. СПИРИН

Россия, г. Арзамас, НПП "Темп-Авиа"
E-mail: temp@arzamas.nnov.ru

Дата поступления в редакцию
16.06 2004 г.

Оппонент С. Н. БАТИЦЕВ
("Оризон-Навигация", г. Смела)

МОНТАЖ МИКРОСБОРОК С ПОДЛОЖКОЙ ИЗ КРЕМНИЯ

Показано преимущество установки бескорпусных кристаллов и компонентов в мини-корпусах на кремниевые платы. Рассмотрены некоторые методы монтажа кремниевых плат к металлическому основанию.

Монтаж микросборок (МСБ) обычно разделяют на две технологические операции — монтаж компонентов на плату и установку МСБ на металлическое основание. Монтаж бескорпусных кристаллов (БК) с проволочными и организованными выводами подробно рассмотрен в [1, с. 88]. Как известно, применение БК с объемными выводами способно обеспечить максимально возможную плотность компоновки МСБ. В [1, с. 108] обозначены две основные проблемы, ограничивающие область применения этих БК, устанавливаемых на коммутационную плату методом перевернутого кристалла:

— в объемных выводах возникают сильные внутренние механические напряжения из-за разницы в температурном коэффициенте линейного расширения (ТКЛР) кристалла и платы;

— для обеспечения качественного монтажа БК требуется разновысотность объемных выводов не хуже $\pm (1...2)$ мкм, что очень сложно выполнить технологически.

Применение кремниевых коммутационных плат решает эти проблемы. Действительно, решение первой проблемы вполне очевидно, т. к. в качестве материала платы используется кремний, что обеспечивает идеальное согласование ТКЛР платы с БК. Вторая проблема решается следующим образом. Перед монтажом компонентов методами технологии поверхностного монтажа на плату наносят защитную паяльную

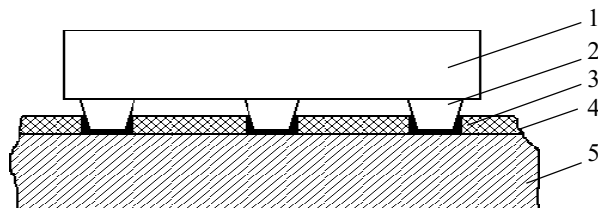


Рис. 1. Установка бескорпусного кристалла с объемными выводами на плату:

1 — бескорпусной кристалл; 2 — объемные выводы; 3 — припой; 4 — защитная паяльная маска; 5 — плата

маску толщиной 20—40 мкм и формируют в ней окна над контактными площадками, предназначенными для монтажа компонентов, а затем на эти контактные площадки наносят припойную пасту толщиной 20—30 мкм (рис. 1). В этом случае разновысотность объемных выводов может достигать ± 10 мкм, т. к. при нагревании припой обволакивает объемные выводы на толщину защитной изоляции, что и обеспечивает высокое качество монтажа БК.

В связи с тем, что в РФ и странах СНГ ограничен выпуск БК, наиболее простым методом уменьшения массогабаритных характеристик микроэлектронной аппаратуры является монтаж компонентов в мини-корпусах на тонкопленочные платы [1, с. 76]. Компоненты в мини-корпусах имеют выводную рамку из кобальта [2, с. 357], который плохо согласуется по ТКЛР с материалом печатной платы [3, с. 39]. Значительно лучше кобальт согласуется по ТКЛР с кремнием (см. таблицу). Поэтому, с позиции надежной работы в широком диапазоне температур, установка компонентов в мини-корпусах на кремниевую плату является более предпочтительной, чем их установка на печатную плату, ТКЛР которой составляет $(14...18) \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$.

Основные физические параметры материалов, используемых при монтаже МСБ

Материал	Кремний	Ковар	Титан	Медь	Алюминий	Припой
ТКЛР, $10^{-6} 1/^\circ\text{C}$	2,3	5,0	8,1	16,6	21	—
Удельная теплопроводность, Вт/(м $^\circ\text{C}$)	109	19,2	21,9	406	218	54
Модуль Юнга, ГПа	130	—	104	74	70,8	—
Относительное удлинение перед разрывом, %	—	32	40	25	30	40
Плотность, г/см 3	2,3	8,35	4,52	8,92	2,7	9,3

Особенностью кремния является его низкий ТКЛР, что затрудняет монтаж плат из этого материала на теплопроводящие основания, которые в большинстве случаев изготавливаются из алюминиевых сплавов. Поэтому конструктивно-технологические вопросы согласования ТКЛР платы и основания требуют специального рассмотрения.

Кремний, несмотря на свои превосходные конструктивные характеристики, обладает серьезным недостатком — хрупкостью. Кроме того, кремниевые платы могут иметь проводники на обеих поверхностях, что также усложняет их установку на металлическое основание. Кремниевые микросборки ха-

рактируются высокой плотностью упаковки и нуждаются в хорошем теплоотводе.

Перечисленные факторы требуют разработки методов монтажа этой разновидности МСБ на металлические основания.

Сформулируем основные требования, которые предъявляются к установке кремниевой МСБ на металлические основания.

1. Механические напряжения в кремниевой плате со стороны основания, возникающие при монтаже, термоциклировании, испытаниях или эксплуатации, должны быть минимальны.

2. Теплоотвод от кремниевой платы должен быть достаточным.

3. Крепление МСБ к основанию должно быть произведено таким образом, чтобы любые ее участки не входили в резонансные колебания в рабочем диапазоне частот при механических испытаниях или эксплуатации.

Рассмотрим известные способы монтажа МСБ с поликоровой подложкой (СВЧ-диапазона) на основании [1, с. 153]. В настоящее время применяются три способа крепления этих МСБ с основанием корпуса — приклеивание, пайка и механическое крепление с помощью винтов.

Приклеивание при монтаже кремниевых МСБ можно использовать весьма ограниченно: при одном уровне коммутации и небольшой рассеиваемой мощности. При этом для согласования ТКЛР следует применять корпус из кобальта.

Пайка СВЧ МСБ осуществляется низкотемпературными припоями, например ПОИН-52, с температурой плавления 125°C. Слои припоя армируют медной сеткой, обеспечивающей гарантированную толщину слоя припоя не менее 0,2 мм, который снимает механические напряжения при пайке и термоциклировании. Для повышения надежности между поликором и алюминиевым основанием используют два слоя припоя толщиной 0,2 мм с прокладкой из титана толщиной 0,3 мм. (Недостатком применения титана является сложность его механической обработки и низкая теплопроводность.) Учитывая, что ТКЛР кремния и алюминия различаются почти в 10 раз, непосредственное применение описанного метода пайки невозможно, т. к. может привести к разрушению кремния. Кроме того, применение сплошного слоя припоя не позволяет крепить платы с двумя уровнями коммутации.

Кремниевые МСБ со средней мощностью рассеяния можно устанавливать на коваровое основание с помощью столбиков припоя. При изготовлении кремниевой платы на ее технологических полях формируют два сквозных отверстия, которые используются при сборке для совмещения платы и основания. Кроме того, в защитной паяльной маске нижней стороны платы формируют квадратные окна, в которых расположены контактные площадки для соединения платы с основанием. Эти окна на плате располагаются равномерно.

Перед сборкой основание МСБ должно быть подготовлено следующим образом. На основание гальванически наносят сплав "олово—свинец" толщиной 2—3 мкм. Затем методом фотолитографии на осно-

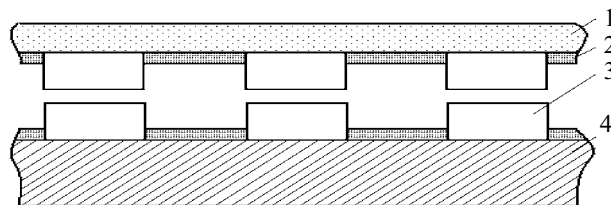


Рис. 2. Соединение МСБ со средней мощностью рассеяния с основанием:

1 — плата; 2 — паяльная защитная маска; 3 — припойная паста; 4 — основание

вании, в месте крепления платы, формируют защитную паяльную маску толщиной 20—40 мкм с окнами, размеры и координаты которых совпадают с размерами и координатами окон платы. Окна нижней поверхности платы и основания с помощью дозатора или через трафарет заполняют припойной пастой, например, 7070 из мелкого порошка припоя ПОСК50-18 с размерами частиц 25—58 мкм и температурой плавления 145—160°C (см. рис. 2). Если на плату установлены бескорпусные кристаллы, то применяют более низкотемпературную припойную пасту.

В конструкции основания выполняют два штифта (или устанавливают технологические штифты), которые предназначены для совмещения окон платы и основания через технологические отверстия платы. Совмещение МСБ и основания производят до соприкосновения встречных столбиков припойной пасты и осуществления их адгезионной связи, но без существенной деформации. (Высота столбиков припоя при этом должна находиться в пределах 0,1—0,2 мм, а размер стороны окна с припойной пастой — 1—3 мм.) Затем основание разогревают до температуры плавления припойной пасты, тем самым осуществляя процесс пайки МСБ к основанию, после чего подогрев основания прекращают.

Мощные и крупноформатные МСБ с подложкой из кремния устанавливают на основание из алюминиевых сплавов, например Д16-Б. Для уменьшения механических напряжений платы во время термоциклов между столбиками припойной пасты помещают прокладку (рис. 3) из мягкой отожженной меди толщи-

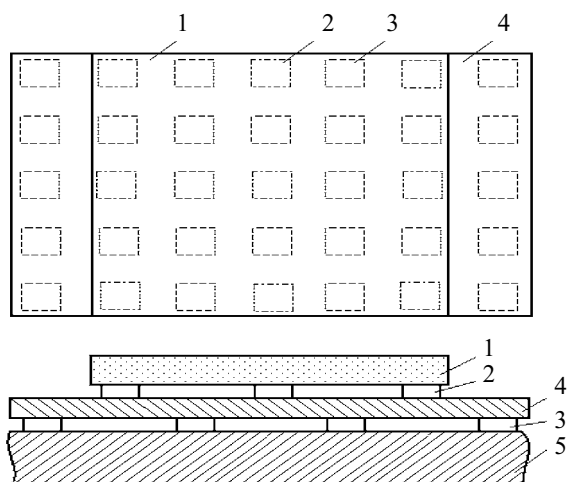


Рис. 3. Соединение МСБ с большой мощностью рассеяния с основанием:

1 — плата; 2, 3 — припой; 4 — медная фольга; 5 — основание

ной 0,1—0,3 мм, на которую предварительно нанесен сплав "олово—свинец" толщиной 2—3 мкм. Так как упругость отожженной меди почти в два раза меньше упругости кремния (см. табл.), то медная прокладка и припой будут легко деформироваться при термоциклах вследствие своего высокого значения относительного удлинения. При этом столбики припоя на плате и основании рекомендуется располагать в шахматном порядке. Прокладка по крайней мере с двух сторон должна выходить за пределы платы и крепиться припоем к основанию. Такое конструктивное решение обеспечивает хороший теплоотвод от МСБ, а также ее пластичное и прочное соединение с основанием.

Для улучшения пластичности соединения на медную прокладку с двух сторон наносят защитную палящую маску с окнами, координаты которых совпадают с координатами окон платы и основания. Перед сборкой окна в медной прокладке заполняют припойной пастой по трафарету. В первом варианте сборки сначала наносят припойную пасту на нижнюю сторону прокладки и производят ее оплавление, затем припойную пасту наносят на верхнюю сторону прокладки. После этого прокладку через проделанные в ней отверстия совмещают с основанием с помощью штифтов, а затем аналогично совмещают МСБ с прокладкой. Далее разогревают основание, оплавливают припой, соединяя МСБ и основание. При втором варианте сборки припойную пасту наносят на нижнюю сторону фольги с помощью трафарета, затем прокладку совмещают с основанием. Далее на верхней поверхности фольги с помощью дозатора (например SMS-300) заполняют припойной пастой окна, после чего совмещают МСБ с прокладкой и оплавливают припой.

МСБ СВЧ-диапазона часто крепятся к основанию с помощью винтов. Винты проходят через отверстия в плате МСБ и закручиваются в резьбовые втулки, установленные в основании. Этот метод крепления также может применяться для крепления кремниевых МСБ. Причем в отличие от поликора, в котором отверстия выполняются механическим способом (из-за чего вокруг них образуются микротрещины), кремний свободен от этого недостатка: крепежные отверстия в кремнии выполняются химическим травлением во время основного технологического цикла формирования переходных отверстий.

Количество крепежных отверстий и их взаимное расположение выбираются исходя из необходимости исключения механических резонансов в рабочем диапазоне частот. Диаметр крепежного отверстия должен быть больше диаметра винта на величину изме-

нений линейных размеров основания относительно кремниевой платы в заданном диапазоне температур. Для улучшения теплоотвода и снижения механических воздействий со стороны основания на плату в местах контакта основания с платой рекомендуется наносить теплопроводящую пасту, например КПТ-8, которая в данном случае, наряду с выполнением функции отвода тепла, будет являться своего рода смазкой, которая обеспечит проскальзывание платы относительно основания при термоциклировании.

Достоинствами крепления платы с помощью винтов являются низкая трудоемкость монтажа и высокая ремонтпригодность, а недостаток заключается в том, что большое количество винтов, которое, возможно, понадобится для обеспечения виброустойчивости, может существенно уменьшить плотность компоновки МСБ.

Еще одной разновидностью монтажа кремниевых МСБ является их крепление к основанию с помощью проволоки малого диаметра. В данном способе крепления один конец проволочного стержня присоединяется к основанию, например, методом пайки в глухое отверстие, а другой конец стержня вставляется в крепежное отверстие платы и запаивается. Лучше всего применять медную проволоку из мягкой отожженной меди, которая будет легко деформироваться при значительных изменениях температуры. Кроме крепления платы проволока исполняет роль теплоотвода. Очевидно, что данный метод монтажа может применяться для МСБ небольшого размера и невысокой мощности рассеяния.

Выводы

Достоинством кремниевых коммутационных плат является то, что на них возможна установка как всех основных видов бескорпусных кристаллов и компонентов, так и компонентов в мини-корпусах.

Рассмотренные технологические процессы существенно улучшают качество и надежность монтажа бескорпусных кристаллов с объемными организованными выводами и компонентов в мини-корпусах на плату. Предлагаемые методы установки микросборок с подложкой из кремния на металлическое основание обеспечивают согласование ТКЛР платы и основания, требуемый теплоотвод, а также минимизацию массогабаритных характеристик микросборок.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Гуськов Г. Я., Блинов Г. А., Газаров А. А. Монтаж микронной аппаратуры.— М.: Радио и связь, 1986.
2. Пирс К., Адамс А., Кац Л. и др. Технология СБИС. Кн. 2.— М.: Мир, 1986.
3. Мэнгин Ч.-Г., Маклеланд С. Технология поверхностного монтажа.— М.: Мир. 1990.

Подписчикам Российской Федерации

Ищите журнал "Технология и конструирование в электронной аппаратуре" в дополнениях к официальным подписным каталогам. Индекс 71141.

Резервные адреса для подписки:

Россия, 192286, С.-Петербург, н/я 416, "ЭРА"; e-mail: era48@mail.ru; тел. (812) 595-40-89.

Украина, 65005, Одесса, ул. Прохоровская, 45, редакция "ТКЭА"; e-mail: tkea@odessa.net; тел. +38(048) 728-18-50, 728-11-89, тел./факс 728-49-46.

Д. т. н. Ю. В. ПАНФИЛОВ, д. ф.-м. н. М. И. САМОЙЛОВИЧ,
к. т. н. Е. В. БУЛЫГИНА

Дата поступления в редакцию
23.11 2004 г.

Россия, г. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, ЦНИТИ «Техномаш»
E-mail: panfilov@mx.bmstu.ru

Оппонент к. ф.-м. н. А. В. СЕМЕНОВ
(Ин-т монокристаллов, г. Харьков)

НАНЕСЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК В ВАКУУМЕ НА ПОДЛОЖКИ ИЗ СИНТЕТИЧЕСКОГО ОПАЛА

Рассмотрено влияние методов термического испарения, ионно-плазменного магнетронного распыления и осаждения тонких пленок из ионного пучка на характеристики поверхности фотонных кристаллов.

Интерес к опаловым матрицам (плотнупакованным наносферам диоксида кремния с диаметром от 200 до 600 нм) [1] с тонкопленочными покрытиями вызван практически неограниченной номенклатурой материалов тонких пленок, диапазоном толщин отдельных слоев и многослойных структур от десятков ангстрем до единиц микрометров, а также другими достоинствами технологии тонких пленок.

В настоящее время отсутствуют публикации об исследованиях различных методов нанесения тонких пленок в вакууме на подложки с рельефом поверхности синтетического опала. Особенностью процесса формирования тонких пленок на строго упорядоченных полусферах поверхности опаловой матрицы является переменный угол осаждения пленкообразующих частиц. В результате этого искажается, по сравнению с «гладкими» образцами, характер появления зародышей, образования монослоя осаждаемого материала и дальнейшего формирования тонкопленочного покрытия.

Целью данного направления исследований является экспериментальное определение влияния метода нанесения тонких пленок в вакууме на геометрические, электрические, оптические и другие свойства поверхности опаловых матриц с тонкопленочными покрытиями.

В представленной работе рассмотрены методы термического испарения, ионно-плазменного магнетрон-

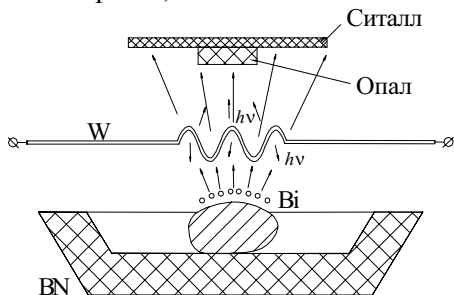


Рис. 1. Схема осаждения тонкой пленки Bi методом термического испарения

ного распыления и осаждения тонких пленок из ионного пучка [2]. В качестве исследуемых характеристик выбраны рельеф тонкопленочного покрытия и электрическое сопротивление поверхности. Эти характеристики определялись на подложках из синтетического опала и на «гладких» ситалловых пластинах, на которые тонкопленочное покрытие наносилось одновременно.

В качестве осаждаемых методом термического испарения материалов были выбраны Sn, Pb, Ni и Bi, небольшие кусочки которых помещались в тигель из нитрида бора (рис. 1) и нагревались вольфрамовой спиралью до температуры испарения. Тонкая пленка наносилась на ситалловую подложку с закрепленным на ней образцом опала.

Метод термического испарения очень прост в реализации, но имеет ограничения по номенклатуре наносимых материалов и обладает самой низкой энергией (доли эВ) пленкообразующих частиц, равной $kT_{\text{и}}$, где k — постоянная Больцмана, $T_{\text{и}}$ — температура испарения материала.

Более универсальными (практически любые материалы тонких пленок, энергии частиц от единиц до сотен эВ, подложки большого размера и т. д.) явля-

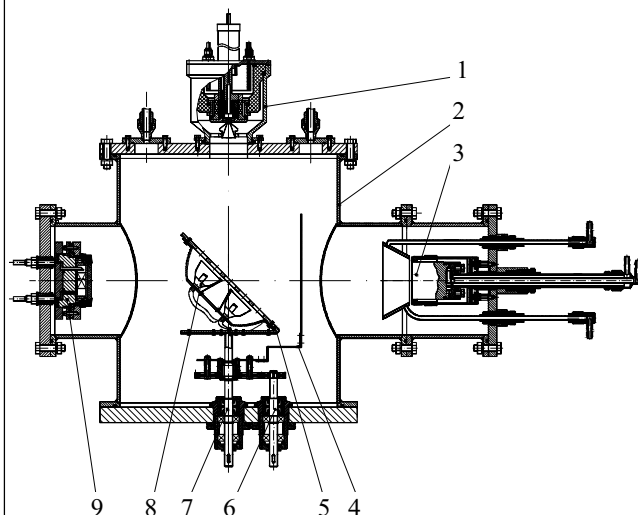


Рис. 2. Схема трехпозиционной установки для нанесения тонких пленок в вакууме:

1 — ионно-лучевой источник; 2 — вакуумная камера; 3 — дуговой источник; 4 — заслонка; 5 — наклоняемый подложкодержатель; 6 — привод поворота заслонки; 7 — привод вращения подложкодержателя; 8 — нагреватель подложек; 9 — магнетрон

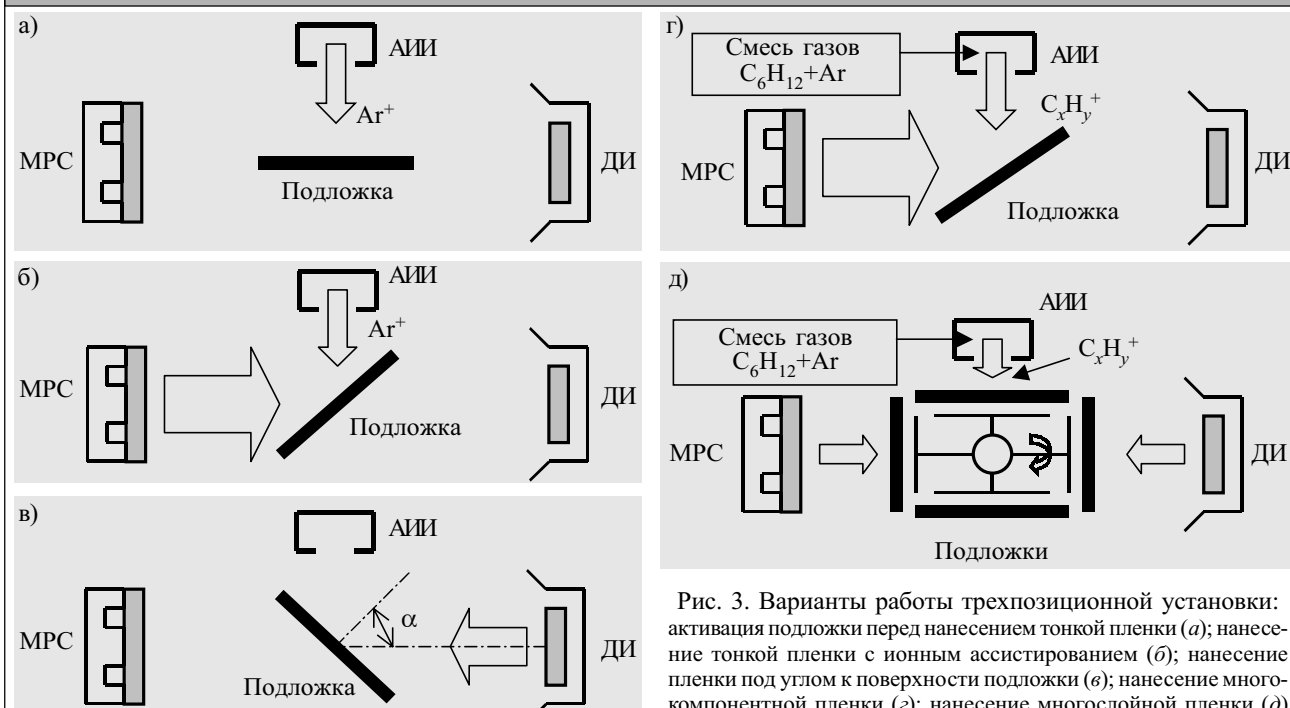


Рис. 3. Варианты работы трехпозиционной установки: активация подложки перед нанесением тонкой пленки (а); нанесение тонкой пленки с ионным ассистированием (б); нанесение пленки под углом к поверхности подложки (в); нанесение многокомпонентной пленки (г); нанесение многослойной пленки (д)

ются ионно-плазменные методы осаждения тонких пленок в вакууме, часть из которых реализована на трехпозиционной установке (рис. 2), оснащенной магнетронной распылительной системой (МРС), дуговым источником (ДИ) и автономным источником ионов (АИИ). Образцы могут закрепляться на наклоняемом столике, размещенном на вводе вращения.

Наличие трех источников и наклоняемого столика позволяет осуществлять несколько вариантов нанесения тонкопленочных покрытий (рис. 3):

- проводить активацию поверхности подложки перед нанесением пленки с помощью АИИ (рис. 3, а);
- наносить пленку с помощью МРС или ДИ с ионно-лучевым ассистированием (рис. 3, б);
- наносить пленку под углом к поверхности подложки (рис. 3, в);
- наносить многокомпонентную пленку при одновременной работе двух или трех источников (рис. 3, г), причем одним из компонентов может быть, например, алмазоподобный углерод, осаждаемый с помощью АИИ из ионного пучка;
- наносить многослойные тонкопленочные покрытия при последовательной работе двух или трех источников (рис. 3, д).

В данной работе ионно-плазменными методами наносились пленки Ti (МРС) и пленки алмазоподобного углерода α -C:H (АИИ), а также комбинации этих материалов.

Электрическое сопротивление измерялось между двумя контактными полосками с одинаковыми длиной и расстоянием между полосками. Сравнивались показания мультиметра для ситалловой и опаловой подложек, на которые пленки наносились одновременно. В результате для всех без исключения случаев сопротивление пленки на опаловой подложке оказывалось существенно больше, чем на ситалле. Так, для пленки Vi толщиной 40 нм сопротивление составило 12 МОм/□ на ситалле и более 200 МОм/□ на опале.

Объяснение этому факту было дано после получения изображения поверхностей с помощью зондовых микроскопов. Увеличение электрического сопротивления тонкой пленки на «рельефной» поверхности опала связано, по нашему мнению, с двумя факторами: разнотолщинностью проводящего слоя (во впадинах пленка в десятки раз тоньше, чем на вершинах полусфер) и уменьшением фактической площади контакта между контактной полоской и пленкой на поверхности опала (рис. 4).

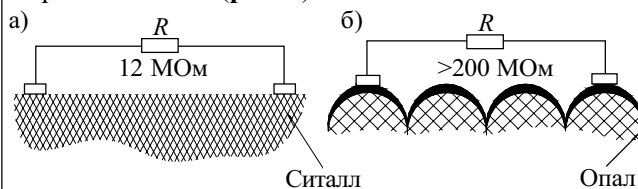


Рис. 4. Схема измерения электрического сопротивления тонкой пленки Vi на «гладком» ситалле (а) и на подложке из синтетического опала (б)

Пленка Ti толщиной 550 нм имела сопротивление 25 Ом/□ на ситалле и 150 Ом/□ на опале. Пятислойная пленка Ti/ α -C:H/Ti/ α -C:H/Ti, нанесенная последовательно источниками МРС и АИИ под углом 45°, имела сопротивление 5 кОм/□ на ситалле и 150 кОм/□ на опале.

Тонкая пленка, нанесенная на «гладкий» ситалл, независимо от материала и метода нанесения имела шероховатость порядка $R_a=2,1...2,3$ нм. Рельеф исходной опаловой подложки без пленки, полученный на сканирующем зондовом микроскопе «ФемтоСкан» (МГУ им. М. В. Ломоносова), показан на рис. 5.

Исследования поверхности опаловой подложки с пленкой Vi, нанесенной методом термического испарения, показали (рис. 6), что преобладающим оказался рост пленки на вершинах полусфер опаловой матрицы, что дало увеличение шероховатости с $R_q=12,02$ нм для исходного опала до $R_q=60,98$ нм для опала с пленкой Vi.

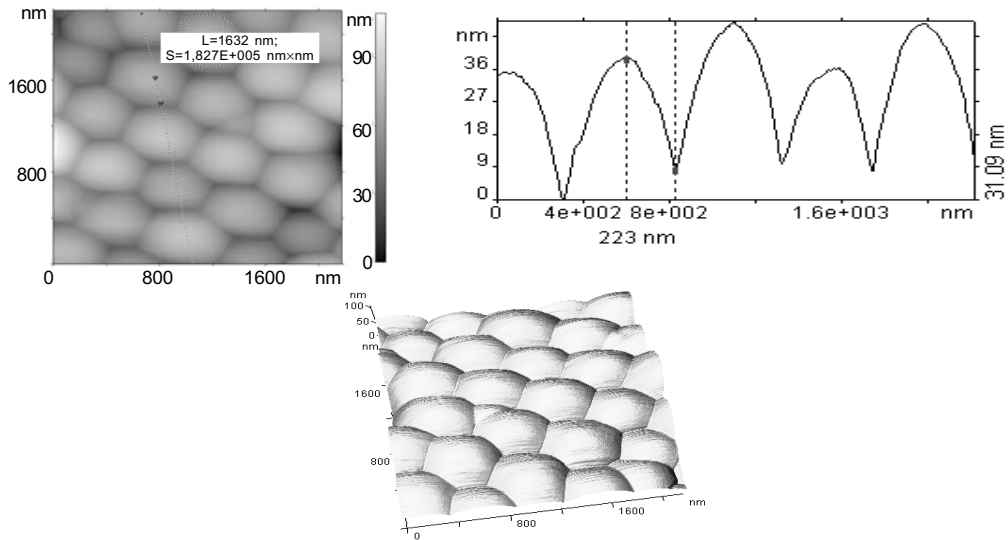


Рис. 5. AFM-изображение поверхности исходного (без пленки) образца опала

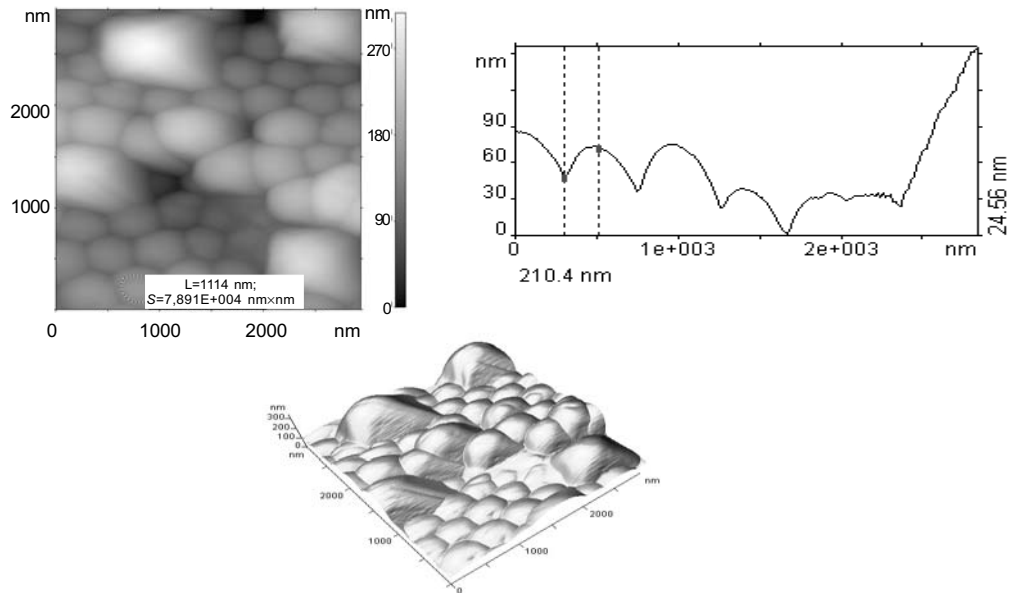


Рис. 6. AFM-изображение поверхности образца опала с пленкой Bi

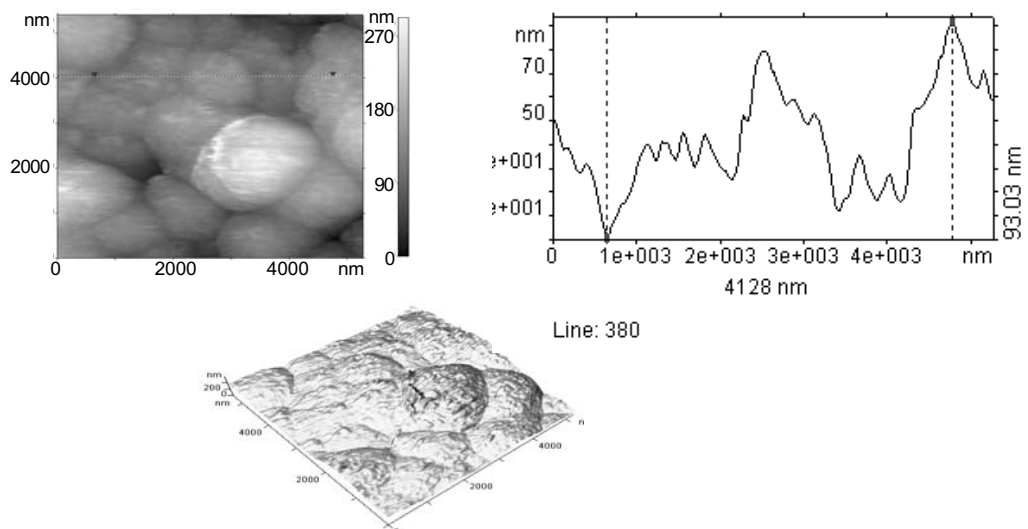


Рис. 7. AFM-изображение поверхности образца опала с пленкой Ti

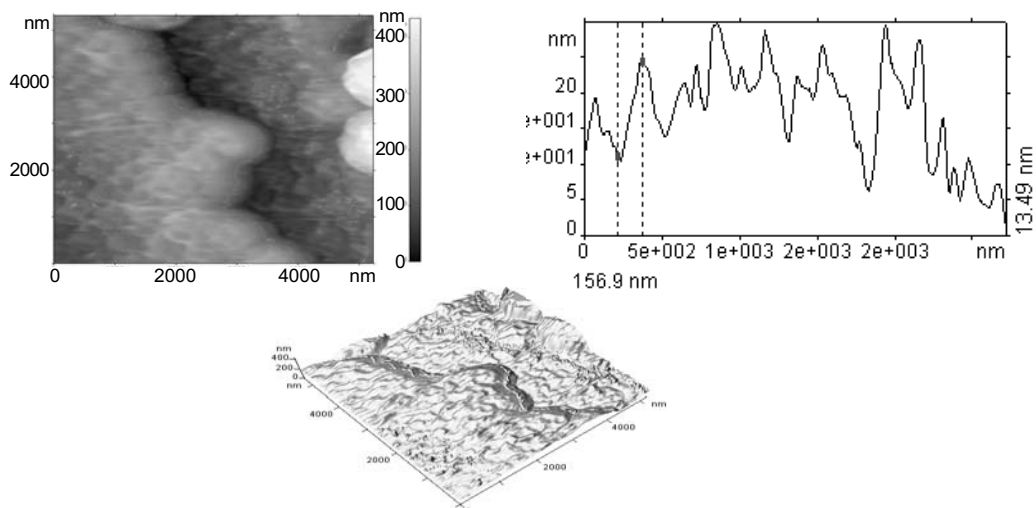


Рис. 8. AFM-изображение поверхности образца опала с пленкой Ti/α-C:H/Ti/α-C:H/Ti

Характеристики топографии поверхности образцов фотонных кристаллов

Образец	Размер скана, нм	R_q , нм	Характерный периметр особенности, нм	Фрактальная размерность D_F	S , нм ²	ΔS , нм ²
Исходный опал	2172×2108×110	12,02	1641	2,00177±0,00006	4,9·10 ⁶	1,05·10 ⁵
Опал с пленкой Bi	2940×2940×340	60,98	1178÷3171	2,0097±0,0003	9,546·10 ⁶	9,03·10 ⁵
Опал с пленкой Ti	5264×5359×585	99,75	8360	2,0143±0,0010	3,286·10 ⁷	4,66·10 ⁶
Опал с пленкой Ti/α-C:H/Ti/α-C:H/Ti	2641×2945×205	26,05	792	2,0194±0,0016	9,649·10 ⁶	1,87·10 ⁶

При магнетронном методе осаждения шероховатость поверхности опала с пленкой Ti также увеличилась ($R_q=99,75$ нм) по сравнению с исходным опалом, но уже без явного преобладания роста пленки на вершинах полусфер опаловой матрицы (рис. 7).

Шероховатость же пленки Ti/α-C:H/Ti/α-C:H/Ti значительно уменьшилась (рис. 8) и составила $R_q=26,05$ нм.

В таблице приведены характеристики топографии поверхности исследованных образцов опаловой матрицы, из которых следует, что по сравнению с исходным опалом у образцов с тонкопленочными покрытиями существенно увеличилась шероховатость (R_q), фрактальная размерность (D_F) и площадь поверхности (S).

Результаты проведенных исследований электрического сопротивления и рельефа поверхности опаловой матрицы с тонкопленочными покрытиями позволяют сделать следующие заключения:

— метод и режимы осаждения тонкопленочных покрытий являются действенным инструментом управления геометрическими и электрическими характеристиками поверхности фотонных кристаллов на основе опаловой матрицы с тонкопленочными покрытиями;

— электрическое сопротивление тонких пленок на опаловой подложке определяется и шероховатостью

поверхности, и, естественно, материалом пленки (его удельным сопротивлением) — многослойное покрытие Ti/α-C:H/Ti/α-C:H/Ti имеет большее сопротивление, чем титановая пленка при той же толщине и значительно меньшей шероховатости поверхности.

Нанесение тонкопленочных покрытий на опаловую матрицу может являться как заключительной операцией, например для получения автоэмиссионных катодов или элементов оптических систем, так и промежуточной операцией перед электрохимическим заполнением пустот в объеме опала или перед формированием топологии на его поверхности, например для получения датчика Холла и других приборов.

Исследования в данном направлении будут продолжены для таких методов нанесения тонких пленок в вакууме как термоионное осаждение, стимулированное плазмой газофазное осаждение и импульсное дуговое осаждение [2].

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Нанотехнологии и фотонные кристаллы: Мат-лы I Международного семинара / Под ред. А. Ф. Белянина, М. И. Самойловича.— Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003.
2. Машиностроение. Энциклопедия. Т. Ш-8. Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении / Под общ. ред. Ю. В. Панфилова.— М.: Машиностроение, 2000.

Г. И. КРАПИВКО

Украина, Херсонский национальный технический университет
E-mail: uane@ukrcom.net

Дата поступления в редакцию
15.06 2004 г.

Оппоненты д. ф.-м. н. И. В. БЛОНСКИЙ
(Институт физики, г. Киев),
д. ф.-м. н. П. В. СЕРБА (ТГРТУ, г. Таганрог)

ЛАЗЕРНОЕ ТЕКСТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАГРЕТОГО МОНОКРИСТАЛЛА КРЕМНИЯ

Осуществлен метод лазерной обработки, основанный на эффективном изменении поверхности при текстурировании предварительно нагретого монокристалла кремния.

Одним из способов повышения КПД солнечных элементов на базе монокристалла кремния в диапазоне волн 200—1000 нм является фронтальное текстурирование поверхности с использованием твердотельных лазеров.

Воздействие на монокристаллический кремний, инициируемое лазерными импульсами, исследовалось во многих работах, например [1]. Как правило, для выяснения основных закономерностей лазерного воздействия решалась задача Стефана. Такой подход оправдан при слабой неравновесности протекающих процессов. Однако, как следует из экспериментальной работы [2], при облучении поверхности нагретого полупроводника лазерными импульсами миллисекундной длительности фазовые переходы протекают в условиях сильной неравновесности. В работе [3] моделирование лазерного отжига аморфизированных слоев кремния с учетом неравновесного характера протекающих процессов основано на рассмотрении фазового состояния ячейки облучаемого образца в зависимости от энтальпии и времени ожидания появления зародыша новой фазы. Другой подход [4] основан на решении задачи Стефана с привлечением нелинейной зависимости скорости движения границы раздела фаз от температуры.

В настоящей работе исследуется модель текстурирования предварительно нагретого монокристаллического кремния при воздействии на его поверхность миллисекундного излучения лазера, учитывающая кинетику фазовых превращений на основе уравнения А. Н. Колмогорова [5, с. 40].

$$V(t) = V_0 \left\{ 1 - \exp \left[- \int_0^t G(t) \varphi(t) dt \right] \right\},$$

где V_0 — исходный объем;
 $G(t)$ — скорость роста;
 $\varphi(t)$ — расплав, образовавшийся в момент времени t .

Аналогичный подход был ранее использован при численном моделировании лазерного отжига аморфизированного кремния [6, 7], где процесс кристаллизации сильно переохлажденного расплава определялся трехмерным механизмом роста готовых зародышей.

Здесь же предполагается, что как плавление, так и кристаллизация происходят в результате гомогенного зародышеобразования по двухмерному механизму послойного роста [8].

Изменение температуры монокристаллического кремния при воздействии на его поверхность наносекундного лазерного излучения с учетом предварительного нагрева образца до температуры плавления описывалось на основе одномерного уравнения теплопроводности

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = E(x) + \frac{\partial}{\partial x} \left[k(x, T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + S(x, t) - pL \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} - \frac{\partial \psi}{\partial t} \right) \quad (1)$$

с граничными и начальными условиями

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad T(x \rightarrow \infty, t) = T_{пл}, \quad T(x, t=0) = T_{пл}, \quad (2)$$

где p — плотность;
 $c(T)$ — удельная теплоемкость;
 $E(x)$ — первичный тепловой источник (печь), осуществляющий косвенный нагрев кристалла до температуры пластичности кремния;
 $k(x, T)$ — коэффициент теплопроводности;
 $S(x, t)$ — тепловой источник;
 L — скрытая теплота фазового перехода;
 $T_{пл}$ — начальная температура.

Тепловой источник $S(x, t)$ в (1) описывает выделение тепла за счет поглощения лазерного излучения:

$$S(x, t) = (1 - R) A(x, T) \tau \exp \left[- \int_0^x A(x, T) dx \right], \quad (3)$$

где R и $A(x, T)$ — коэффициенты отражения и поглощения;
 W и τ — плотность энергии и длительность лазерного импульса, соответственно.

Последние два члена в правой части уравнения (1) описывают мощность тепловых стоков и источников при плавлении и кристаллизации кремния. Здесь $\varphi(x, t)$ — доля расплава, образовавшегося в точке x к моменту времени t после начала плавления; $\psi(x, t)$ — доля закристаллизовавшегося расплава в точке x к моменту времени t после начала кристаллизации, причем должно выполняться условие

$$\varphi(x, t) + \psi(x, t) + \gamma(x, t) = 1,$$

где $\gamma(x, t)$ — доля монокристалла, не расплавившегося в точке x к моменту времени t .

В рамках теории фазовых переходов доля образовавшейся новой фазы выражается через частоту зародышеобразования $J(t)$ и скорость роста $G(t)$ [8, с. 74] —

$$\varphi(x, t) = 1 - \exp \left\{ \beta \int_{t_0}^t J(t) \left[\int_{\tau}^t G(t^i) dt^i \right]^n dt \right\}, \quad (4)$$

где β — константа формы;
 t_0 — время начала зародышеобразования в точке x ;
 $J(t)$ — функция, вид которой определяется механизмом зародышеобразования.

В настоящей работе кинетика плавления и кристаллизации рассматривается в рамках модели послойного роста [9, с. 117], т. е. предполагается, что рост новой фазы происходит за счет наращивания последовательных слоев. Формирование каждого слоя идет путем двухмерного роста зародышей (показатель степени в (4) $n=2$), причем зародыши нового i -го слоя могут возникать лишь на закристаллизовавшихся участках предыдущего $(i+1)$ -го слоя. В этом случае выражение для частоты зародышеобразования имеет вид [8, с. 75]

$$J(t) = N \frac{kT}{h} \exp \left(-\frac{U}{kT} \right) \exp \left(-\frac{\pi a \sigma^2 T_{\tau}}{kT \Delta T} \right), \quad (5)$$

где $N = N_0 f(x, t)$;
 N_0 — число атомов на границе раздела;
 $f(x, t)$ — доля монокристаллической фазы предыдущего слоя, на котором могут возникать центры кристаллизации очередного слоя, $f(x, t) = \psi(x+a, t) + \gamma(x+a, t) = 1 - \varphi(x+a, t)$;
 h — глубина плавления.

При плавлении центры жидкой фазы могут возникать только на кристаллических участках данного слоя, и в этом случае $f(x, t) = 1 - \varphi(x, t)$ [8, с. 76], U — энергия активации перехода атома через границу раздела фаз, a — межатомное расстояние (высота монослоя), σ — поверхностная энергия границы раздела фаз, $\Delta T = T - T_{\tau}$ при плавлении и $\Delta T = T_{\tau} - T$ при кристаллизации, T_{τ} — температура плавления.

Для скорости роста использовалось выражение [9, с. 117]

$$G(t) = a \frac{kT}{h} \exp \left(-\frac{U}{kT} \right) \left[1 - \exp \left(-\frac{L \Delta T}{kT_{\tau} T} \right) \right], \quad (6)$$

где L — теплота плавления в расчете на один атом.

В переходной зоне, состоящей из расплава и кристалла кремния, параметры задачи определялись следующим образом [6]:

$$\alpha(x, t) = \varphi(x, t) \alpha_l(x, t) + [1 - \varphi(x, t)] \alpha_s(x, t), \quad (7)$$

где индексы l и s относятся к жидкой и кристаллической фазам, соответственно.

Параметр	Кристаллический кремний	Расплав
$\rho, \text{g/cm}^3$	2,329	2,53
$c, \text{J/gK}$	0,844	1,04
$L, \text{J/g}$	1780	—
$k, \text{W/cm K}$	0,3	0,585
R	0,35	0,72
α, cm^{-1}	4478	10^6
$\sigma, \text{erg/cm}^2$	300	—
U, eV	1,12	—

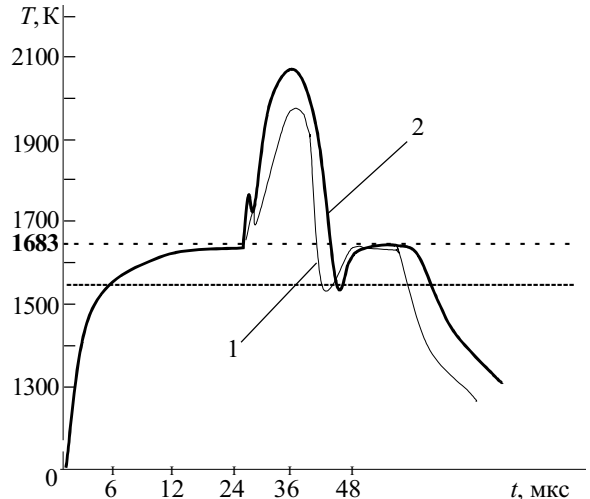


Рис. 1. Зависимость температуры поверхности кремния от времени при плотности энергии лазерного облучения $W=0,8 \text{ Вт/см}^2$ (1) и $1,1 \text{ Вт/см}^2$ (2)

Уравнения (1)–(7) решались методом прогонки. Форма лазерного импульса задана функцией [10, с. 184] $W(t) = 25[\exp(-10^5 t) - \exp(-2 \cdot 10^5 t)] \tau(t)$.

Приведенные в таблице значения параметров кремния взяты из [11].

На рис. 1 показаны временные зависимости температуры поверхности монокристаллического кремния при плотности энергии $W = 0,8 \text{ Вт/см}^2$ и $1,1 \text{ Вт/см}^2$. Видно, что на начальном этапе нагрева наблюдается узкий пик на температурной кривой. Данный пик возникает к моменту начала плавления кремния и соответствует перегреву приповерхностного слоя. Величина градиента T перед плавлением достигает значений $\Delta T = 100 \text{ К}$ как при $W = 0,8 \text{ Вт/см}^2$, так и при $1,1 \text{ Вт/см}^2$. За время $\Delta t < 1 \text{ мкс}$ в приповерхностном слое толщиной $\Delta x = 0,075 \text{ мкм}$ (рис. 2) возникают зародыши жидкой фазы, которые при $\Delta T = 100 \text{ К}$ начинают расти с высокой скоростью. Из-за большой величины скрытой теплоты фазового перехода кремния L возникновение зародышей расплава и их рост приводят к уменьшению перегрева на переднем фронте двухфазной зоны, охлаждению

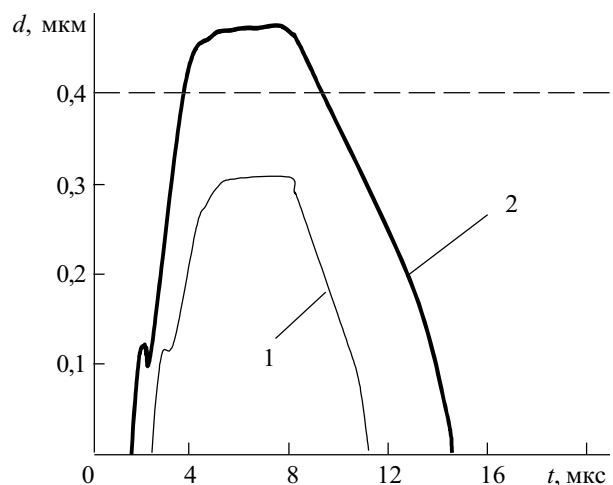


Рис. 2. Зависимость глубины текстурирования кремния от времени при плотности энергии облучения $W=0,8$ (1) и $1,1 \text{ Вт/см}^2$ (2)

прилегающих кристаллических областей и существенному замедлению скорости распространения переднего фронта. При медленно продвигающейся вглубь образца передней границе на поверхности происходит увеличение доли расплава и формирование задней границы переходной зоны, т. е. сплошного слоя жидкой фазы. Таким образом, на начальном этапе плавления монокристаллического кремния за время $\Delta t=1$ мкс на поверхности образуется слой расплава толщиной $\Delta x=0,07...0,08$ мкм с достаточно узкой переходной зоной $\Delta x=0,015$ мкм (рис. 2).

Дальнейший нагрев кремния лазерным излучением приводит вновь к увеличению перегрева и скорости движения переднего фронта, которые достигают на данном этапе своих максимальных значений. По мере продвижения расплава вглубь образца и уменьшения поступления световой энергии происходит постепенное снижение перегрева и скорости распространения, а к моменту окончания воздействия лазерного излучения продвижение расплава вглубь полупроводника прекращается и двухфазная зона остается неподвижной в течение $\Delta t=6$ мкс (рис. 2). За это время в результате оттока тепла в объем образца, который уже не компенсируется лазерным излучением, перегрев полностью исчезает и расплав переохлаждается в районе переходной зоны до $\Delta T=90$ К, а на поверхности — до 80 К (рис. 1).

Таким образом, во время действия лазерного луча изменение во времени перегрева кристаллического кремния и переохлажденного расплава носит немонотонный характер и определяется кинетикой фазовых превращений. Максимальные значения перегрева и переохлаждения достигаются соответственно на начальных стадиях плавления и кристаллизации и примерно равны 100 К. При $W=0,8$ Вт/см² наблюдается текстурирование в виде перевернутого усеченного конуса. При $W=1,1$ Вт/см² полный прожиг образца d составляет 0,4 мм.

Заключение

Представленное моделирование процесса текстурирования предварительно нагретого монокристаллического кремния при воздействии на его поверхность

излучения лазера с учетом кинетики фазовых превращений подтверждено экспериментом.

Регистрация фазовых переходов проводилась с помощью двухмерного механизма зародышеобразования и роста новой фазы. Определено, что временные зависимости степени перегрева монокристалла и переохлаждения жидкой фазы соответственно на стадиях плавления и кристаллизации кремния носят немонотонный характер и определяются кинетикой фазовых превращений. Пиковые значения степени перегрева и переохлаждения составляют 80—90 К. Фазовые переходы протекают в условиях сильной неравновесности.

Показано, что для прожигания кремния на переходе фаз необходим лазер с импульсной мощностью намного меньшей, чем в твердой фазе.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

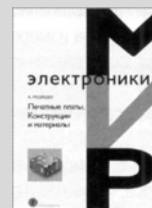
1. Пилипович В. А., Малевич В. Л. Перекристаллизация монокристаллов кремния при квантовом воздействии // ИФЖ.— 1985.— Т. 48, № 2.— С. 306—312.
2. Аверьянова М. Ю., Карпов С. Ю., Ковальчук Ю. В. и др. Условия процесса изменения поверхности полупроводников при воздействии наносекундных лазерных импульсов // Письма в ЖТФ.— 1986.— Т. 12, вып. 18.— С. 1119—1123.
3. Баландин В. Ю., Двуреченский А. В., Александров Л. Н. Улучшение поверхности кремния за счет лазерного отжига // Поверхность. Физика, химия, механика.— 1986.— № 1.— С. 53—60.
4. Cemy R, Sasik R., Lukes I., Chab V. Laser production and deposition of light-emitting silicon nanoparticles // Phys. Rev. B.— 1991.— Vol. 44, N 9.— P. 4097—4102.
5. Лазерная техника и технология. Кн. 4. / Под ред. А. Г. Григорянц.— М.: Высш. школа, 1988.
6. Жвавий С. П. Лазерный отжиг аморфизированного кремния // ЖПС.— 1989.— Т. 50, № 4.— С. 589—595.
7. Жвавий С. П., Садовская О. Л. Моделирование процесса кристаллизации кремния // Поверхность. Физика, химия, механика.— 1990.— № 11.— С. 101—106.
8. Беленький В. З. Геометрико-вероятностные модели кристаллизации.— М.: Наука, 1989.
9. Скрипов В. П., Коверда В. П. Спонтанная кристаллизация переохлажденных жидкостей.— М.: Наука, 1984.
10. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. Руководство к решению задач.— М.: Высш. школа, 1987.
11. <http://www.ioffe.ru/>.

НОВЫЕ КНИГИ

Медведев А. Печатные платы. Конструкции и материалы.— М.: Техносфера, 2005.— 304 с.

Печатный монтаж — основное средство межсоединений в электронике. И от его совершенства зависят основные характеристики электронных устройств. Технологии печатного монтажа развиваются вслед за увеличением интеграции элементной базы так, чтобы использовать все ее преимущества в увеличении плотности компоновки электронных узлов и блоков. Электроника — наиболее быстро развивающаяся область науки и техники, одно поколение сменяет другое каждые три—пять лет. Меняются и технологии печатных плат, сборки и монтажа компонентов, составляющих основу печатного монтажа. Базовые технологии печатных плат обрывают новыми приемами и операциями, расширяются их возможности за счет использования прецизионного оборудования, более качественных материалов.

В книге известного российского специалиста описаны схемы процессов, технологические операции, материалы, принципы тестирования и технологического обеспечения надежности межсоединений. Она предназначена для технологов, специализирующихся в производстве печатных плат. Будет полезна и конструкторам, чтобы они могли осознанно выбирать проектные нормы конструирования, исходя из реального технологического состояния производства. Положительно скажется ее прочтение и на уровне управления производством. Преподаватели технических университетов и коллегей могут рекомендовать ее в качестве учебного пособия по курсу "Конструирование и технология производства электронной аппаратуры".



К. т. н. Г. Е. АДАМОВ, к. т. н. Е. П. ГРЕБЕННИКОВ,
к. ф.-м. н. А. Г. ДЕВЯТКОВ

Россия, г. Москва, Центральный научно-исследовательский
технологический институт «Техномаш»
E-mail: ntc_technology@socket.ru

Дата поступления в редакцию
01.02.2005 г.

Оппонент к. т. н. Д. А. ГРИНЬКО
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

ФОТОХРОМНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПЛЕНОК БАКТЕРИОРОДОПСИНА ДЛЯ УСТРОЙСТВ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Работа проведена в рамках создания элементов устройств обработки информации на основе белка бактериородопсина.

Развитие планарных кремниевых технологий ведет к уменьшению физических размеров элементов. В настоящее время для полупроводникового транзистора достигнуты размеры <100 нм. Ожидаемый в ближайшие несколько лет переход литографии на использование ультрафиолетового излучения с длиной волны $\lambda=13,5$ нм и мягкого рентгеновского излучения позволит получать элементы с размерами 10—20 нм. В настоящее время в России осуществляются проекты по созданию нанотранзисторов с длиной каналов 50 нм, а также по разработке зондовых технологий формирования элементов с размерами <10 нм.

Уменьшение размеров элементов приводит к появлению новых физических свойств, характерных для нанометрового диапазона: значительную роль начинают играть квантовые явления. Очевидно, что построение и функционирование устройств электронной техники с применением наноразмерных элементов, основанное на иных физических принципах, требует разработки новых материалов и технологических решений по сравнению с используемыми в современной микроэлектронике. Многообещающим является создание функциональных структур, в которых роль элементов выполняют отдельные молекулы (молекулярная электроника). В связи с этим ведется поиск, создание и применение бистабильных молекул и молекулярных комплексов, имитирующих работу полупроводникового транзистора, широко исследуются наноструктурированные и супрамолекулярные материалы, позволяющие создавать устройства на основе самоорганизации функциональных структур в ходе технологического процесса.

Созданы первые экспериментальные образцы устройств молекулярной электроники: оперативное запоминающее устройство на базе органического полимера класса ротаксанов емкостью 64 бита на площади $1 \cdot 10^{-8}$ см² (компания «Хьюлетт-Паккард») [1]; трехмерное (3D) устройство памяти на основе молекул органического вещества хироптицена с емкостью до 1 Тбит в объеме 1 см³ (компания «КАЛМЕК») [2].

Большие перспективы в плане создания элементов устройств обработки информации связаны с биоорганическим полимером бактериородопсином (БР) [3], получение которого освоено в промышленных масштабах. В Сиракузском университете США на действующих макетах проверены принципы и показана возможность построения на основе БР объемных модулей оперативной памяти с емкостью 80 Гбит в объеме 3 см³ [4, 5].

Молекулы БР имеют размер 5 нм и образуют двумерные биологические кристаллы, которые называют пурпурными мембранами. Бактериородопсин обладает фотоэлектрическими свойствами, управляется оптическим воздействием и внешним электрическим полем. Материалы на основе БР обладают фотохромными свойствами (основное состояние БР570 с максимумом поглощения $\lambda=570$ нм и одно из промежуточных состояний М412 с максимумом поглощения $\lambda=412$ нм), характеризуются хорошей пороговой чувствительностью (0,01 Дж/см²), оптическим разрешением (до 5000 лин/мм), наивысшей среди известных материалов циклическостью ($>1 \cdot 10^6$) [6]. Экспериментально доказано, что в технических устройствах ресурс БР составляет не менее 10^5 ч [7]. Физико-химические параметры БР позволяют применять методы формирования топологии, используемые в микроэлектронике и микрофотонике. С использованием БР могут быть получены наноконформные материалы, содержащие металлические наночастицы, полимерные структуры, правильные кубические упаковки наносфер SiO₂ (3D фотонные кристаллы) [8].

Природный БР обладает уникальными для биологического материала функциональными свойствами [3, 6, 9]. Однако для наиболее эффективного применения перспективны модифицированные материалы на основе БР, например с измененной хромофорной частью [10, 11] или аминокислотной последовательностью БР [4, 12], с добавлением веществ-модификаторов [13, 14] и т. д.

В результате исследований немодифицированных пленок БР установлено, что функциональные параметры этих пленок нестабильны во времени — наилучшие сразу после получения, они затем ухудшаются до некоторых постоянных значений, которые сохраняются в течение десятка лет. Необходимо отметить, что эксперименты проводились в условиях, исключая влияние процесса световой-темновой адаптации [3] на свойства пленок. Первоначально в

сформированных пленках молекулы БР образуют структуру, обладающую высокой чувствительностью, которая со временем разрушается вследствие тепловых колебаний.

Одной из важнейших задач для наиболее эффективного применения пленок на основе БР является стабилизация и сохранение высоких значений чувствительности в течение всего периода эксплуатации. Возможным решением является создание дополнительных связей (ковалентных или водородных) между молекулами белка при использовании химических реагентов. Сшивка БР тартриллидиазидом за счет образования ковалентных связей исследовалась ранее [15], однако авторы не преследовали цель стабилизации структуры пленок БР.

Влияние на функциональные свойства БР при помощи веществ-модификаторов является сравнительно простым, технологичным и высокоэффективным методом. Введение бифункциональных веществ, возможно, позволит связывать молекулы БР друг с другом, структурируя материал, придавая ему более высокую стабильность, что, вероятно, приведет к улучшению функциональных свойств БР.

Целью данной работы было исследование влияния глутарового альдегида ($C_5H_8O_2$) на функциональные свойства пленок природного БР (штамм ET1001). Являясь симметричным бифункциональным альдегидом, $C_5H_8O_2$ способен взаимодействовать с аминокруппами лизина (К), расположенными на поверхности пурпурных мембран (K40, K41, K129 и K172 на цитоплазматической стороне), образуя с ними ковалентно связанное основание Шиффа.

Пленки из материалов на основе бактериородопсина были приготовлены при заданных параметрах температуры и влажности в специализированной камере (модель 518С, компания Electro-Tech Systems Inc., США). В проведенном исследовании были заданы следующие параметры: температура $20 \pm 1^\circ C$, влажность $50 \pm 2\%$. В дальнейшем образцы хранились при комнатной температуре и влажности (не более 30%) в течение всего времени эксперимента.

В качестве показателя стабильности пленок БР была выбрана фотохромная чувствительность и рассмотрено ее изменение в процессе исследований пленок, что позволяет оценить их стабильность и качество. Измерения фотохромной чувствительности проводились на стенде, подробно описанном в [16]. Для пленок бактериородопсина, полученных различными методами и отличающихся толщиной, оптическим поглощением, составом, строением, был выбран критерий для количественной оценки чувствительности — коэффициент, численно равный доле молекул, ушедших из основного состояния БР570 при фиксированной энергии воздействия. Этот коэффициент $k_{570}(t)$, который мы назвали коэффициентом фотоиндуцированного перехода молекул бактериородопсина из основного состояния БР570, определялся из экспериментальных кривых изменения оптического поглощения на длине волны 570 нм при действии возбуждающего излучения:

$$k_{570}(t) = \frac{\lg(I_{570}(t)/I_{570}(0))}{\lg(I_{570}(0)/I_{0,570})}$$

где $I_{570}(t)$ — интенсивность прошедшего через пленку тестирующего излучения в момент времени t (в процессе возбуждения);

$I_{570}(0)$ — интенсивность прошедшего через пленку тестирующего света в начальный момент времени;

$I_{0,570}$ — интенсивность падающего (тестирующего) излучения.

Для получения сравнительной количественной характеристики коэффициент $k_{570}(t)$ рассчитывался для определенного момента времени — момента окончания действия (10 с) импульса возбуждающего излучения. Подробный математический вывод коэффициента $k_{570}(t)$ и ряда других параметров, полученных на основе исследований фотоиндуцированного изменения оптического пропускания, в том числе и временных характеристик фотоцикла, описан в [17].

На рис. 1 приведены временные зависимости $k_{570}(t)$, полученные для БР: $C_5H_8O_2=1:30$, 1:10 и 1:5 штамма ET1001. Для щелочного катализа реакции образования основания Шиффа между аминокруппами лизина молекул БР и альдегидными группами $C_5H_8O_2$ в исходную суспензию вводился $Na_2B_4O_7$ в соотношении БР и $Na_2B_4O_7$ 1:100. Образцы БР: $C_5H_8O_2=1:5$ имеют наиболее высокие величины $k_{570}(t) = 0,45$, в отличие от образцов БР: $C_5H_8O_2 = 1:10$ и 1:30 ($k_{570}(t) = 0,31$) с высоким содержанием продукта окисления глутарового альдегида атмосферным O_2 (глутаровой кислоты), частично разрушающего БР. Были также получены пленки с меньшим содержанием $C_5H_8O_2$, чем в БР: $C_5H_8O_2 = 1:5$,

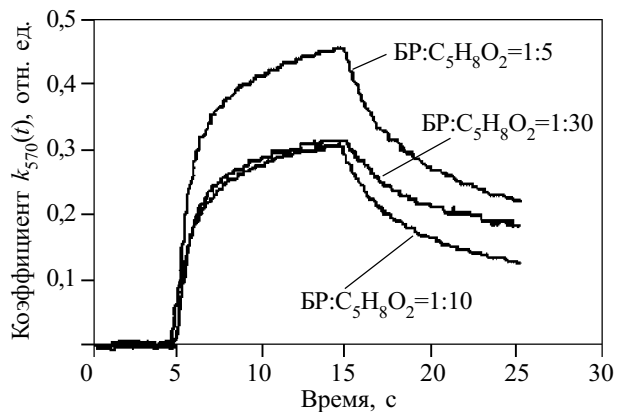


Рис. 1. Временные зависимости $k_{570}(t)$, полученные для пленок БР: $C_5H_8O_2 = 1:30$, 1:10 и 1:5

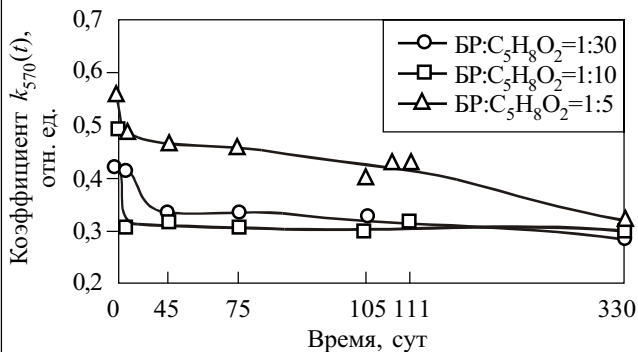


Рис. 2. Изменение значений $k_{570}(t)$ в ходе эксплуатации пленок БР: $C_5H_8O_2 = 1:30$, 1:10 и 1:5

однако они демонстрировали значения $k_{570}(t)$ на уровне образцов с соотношением БР: $C_5H_8O_2 = 1:10$.

Исследована динамика изменения значений коэффициента $k_{570}(t)$ для пленок БР: $C_5H_8O_2$ в течение года (рис. 2). Образцы БР: $C_5H_8O_2 = 1:5$ на протяжении 120 сут сохраняют высокие значения $k_{570}(t) (\geq 0,45)$, что вдвое больше, чем у обычных пленок [18]. Спустя 330 сут для всех образцов БР: $C_5H_8O_2$ $k_{570}(t) = 0,3$.

Таким образом, в результате проделанной работы можно сделать следующие выводы.

1) Модифицирование пленок бактериородопсина введением глутарового альдегида в молекулярном соотношении БР: $C_5H_8O_2 = 1:5$ позволяет повысить фотохромную чувствительность в два раза по сравнению с немодифицированными пленками.

2) Образцы БР: $C_5H_8O_2 = 1:5$ сохраняют высокие значения фотохромной чувствительности на протяжении 120 сут.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. <http://www.hpl.hp.com/news/2002/oct-dec/patent.html>
2. <http://www.molecularelectronics.com/memory.html>
3. Всеволодов Н. Н. Пигменты-фоторегистраторы. — М.: Наука, 1988.
4. Birge R. R., Gillespie N. B., Izaguirre E. W. et al. Biomolecular electronics: protein-based associated processors and volumetric memories // Journal Physical Chemistry B. — 1999. — Vol. 103, N 49. — P. 10746—10766.
5. Stuart J. A., Marcy D. L., Wise K. J., Birge R. R. Volumetric optical memory based on bacteriorhodopsin // Synthetic Metals. — 2002. — Vol. 127. — P. 3—15.
6. Hampp N. Bacteriorhodopsin as a photochromic retinal protein for optical memories // Chemical Review. — 2000. — Vol. 100. — P. 1755—1776.
7. Гребенников Е. П. Многослойные структуры, включающие слои на основе бактериородопсина, для компонентов информационных систем и нейросетевых технологий // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: ЦНИТИ «Техномаш», 2000.
8. Samoilovich M. I., Belyanin A. F., Grebennikov E. P., Guriyanov A. V. Bacteriorhodopsin — the basis of molecular superfast nanoelectronics // Nanotechnology. — 2002. — Vol. 13. — P. 763—767.

9. Oesterhelt D., Braeuchle C., Hampp N. Bacteriorhodopsin: a biological material for information processing // Quarterly Reviews of Biophysics. — 1991. — Vol. 24. — P. 425—478.

10. Хитрина Л. В., Лазарова Ц. Р. Исследование 13-цис и полностью-транс-изомеров 4-кеторетиналя // Биохимия. — 1989. — Т. 54, № 1. — С. 136—139.

11. Адамов Г. Е., Гнатюк Л. Н., Голдобин И. С. и др. Исследование фотохромных свойств суспензий и пленок бактериородопсина с модифицированной хромофорной частью для использования в устройствах оптической обработки информации / Мат-лы 1-го Межрегионального семинара "Нанотехнологии и фотонные кристаллы". — Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003. — С. 166—177.

12. Holz M., Drachev L. A., Mogi T. et al. Replacement of aspartic acid-96 by asparagine in bacteriorhodopsin slows both the decay of the M intermediate and the associated proton movement // Proceedings of the National Academy of Sciences USA. — 1989. — Vol. 19. — P. 2167—2171.

13. Адамов Г. Е. Влияние парафенилендиамина на фотохромные свойства пленок бактериородопсина // Мат-лы VIII Междунар. науч.-технич. конф. "Высокие технологии в промышленности России". — М.: ЦНИТИ «Техномаш», 2002. — С. 84—89.

14. Адамов Г. Е., Гребенников Е. П., Девятков А. Г. Технологии и материалы для получения пленок на основе бактериородопсина, модифицированного аминокислотами // Мат-лы X Междунар. науч.-технич. конф. "Высокие технологии в промышленности России". — М.: ЦНИТИ «Техномаш», 2004. — С. 266—270.

15. Dellweg H.-G., Sumper M. Selective formation of bacteriorhodopsin trimers by crosslinking of purple membrane // FEBS Letters. — 1978. — Vol. 90. — P. 123—126.

16. Адамов Г. Е., Девятков А. Г., Голдобин И. С., Гребенников Е. П. Стенд для исследования фотохромных свойств материалов на основе бактериородопсина / Мат-лы VIII Междунар. науч.-техн. конф. «Высокие технологии в промышленности России». — М.: ЦНИТИ «Техномаш», 2002. — С. 255—259.

17. Адамов Г. Е., Девятков А. Г., Голдобин И. С., Гребенников Е. П. Оперативный метод оценки параметров бактериородопсинсодержащих материалов // Мат-лы 6-й Междунар. конф. «Молекулярная биология, химия и физика неравновесных систем». — Иваново: ИвГУ, 2002. — С. 208—211.

18. Адамов Г. Е. Слоистые структуры на основе бактериородопсина: получение, строение и применение для элементов устройств обработки информации / Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: ЦНИТИ «Техномаш», 2004.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Немудров В. Г., Мартин Г. Системы-на-кристалле. Проектирование и развитие. — М.: Техносфера, 2004. — 216 с.

В книге рассмотрены различные аспекты проектирования и развития нового класса перспективной электронной элементной базы — "система-на-кристалле" ("system-on-chip", сокращенно SoC).

Описываются характерные особенности проектирования SoC: многократное использование в процессе проектирования IP-блоков (блоков интеллектуальной собственности — Intellectual Property), введение в САПР "системного" уровня, спиралевидная модель маршрута проектирования и т. д.

Анализируется новая мировая инфраструктура проектирования и производства SoC, сложившаяся в мире в начале 2000-х годов.

Описана новая методология проектирования на основе многократного использования IP-блоков.

Изложена полная методология проектирования, включающая системный, функциональный, логический и физический уровни проектирования SoC.

Описаны особенности и преимущества использования языка System C в процессе проектирования SoC на системном уровне.

На конкретном примере SoC в прикладной области беспроводной связи третьего поколения рассмотрены особенности алгоритмически ориентированных методов проектирования SoC. Рассмотрены также методы "платформенного" проектирования SoC.

Книга будет полезна студентам, аспирантам и преподавателям, инженерам-разработчикам и другим специалистам различных областей современной электроники.



К. ф.-м. н. А. А. БАЛИЦКИЙ

Украина, Львовский национальный ун-т им. Ивана Франко
E-mail: balitskii@rd.wups.lviv.uaДата поступления в редакцию
20.12 2004 г.Оппонент д. ф.-м. н. И. Д. ЩЕРБА
(ЛНУ им. Ивана Франко, г. Львов)

ФОРМИРОВАНИЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР GaTe/CdSe ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Методом молекулярно-пучковой эпитаксии селенида кадмия на слоистую подложку GaTe получена структура многокомпонентного состава с присутствием незначительной части металлического кадмия.

Как известно, в последние годы халькогениды кадмия (сульфиды, селениды, теллуриды) широко используются в конструировании солнечных элементов в качестве как абсорбирующих элементов (CdSe, CdTe), так и оптических окон (CdS) [1, 2]. Проблему отличий симметрий окна (гексагональная) и абсорбанта (кубическая) и параметров решеток (до 10%) решает взаимная диффузия компонентов, которая попутно увеличивает ширину гетероперехода. С другой стороны, высокая токсичность кадмия резко сокращает использование этих элементов в бытовых приборах. Поэтому идет активный поиск материалов, способных заменить хотя бы одно соединение халькогенидов кадмия в вышеуказанных структурах. Идеальными с этой точки зрения представляются халькогениды металлов третьей группы, которые, как правило, имеют слоистую структуру. Отсутствие свободных связей на поверхности таких полупроводников позволяет использовать ван-дер-вальсовскую эпитаксию для формирования гетероструктур из соединений с различными типами симметрии и большим расхождением параметров решеток (до 70%) [3].

Среди гетероструктур на основе слоистых полупроводников теллурид галлия является одним из наименее изученных, гетероструктурам на его основе посвящено лишь несколько работ [4, 5]. Поэтому целью данной работы явилось исследование возможности формирования структуры GaTe/CdSe методом молекулярно-пучковой эпитаксии.

Исследования проводились на слоистых подложках теллурида галлия, выращенных методом Бриджмена. Подложки помещались в сверхвысоковакуумную камеру, где они скальвались по плоскости естественного скола (перпендикулярно кристаллографической оси *b*). Подготовленная таким образом поверхность не содержала кислорода и углерода и не нуж-

далась в дополнительной обработке. Эпитаксия и рентгеновская фотоэмиссионная спектроскопия (РФЭС) проводились в сверхвысоковакуумной камере с остаточным давлением газов ниже 10^{-9} мбар.

Вследствие очень низких коэффициентов прилипания свободной поверхности GaTe эпитаксия проводилась при повышенной температуре (200°C). Для эпитаксии использовались некоммерческие эфузионные ячейки CdSe. Скорость эпитаксии, оцененная с помощью характерных глубин выхода электронов, составляла 0,02 нм/с, максимальная толщина пленки — около 200 нм.

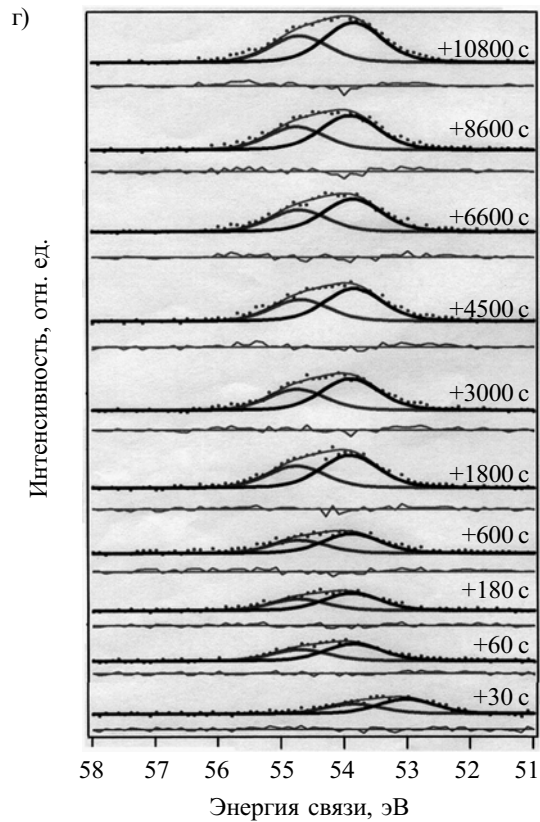
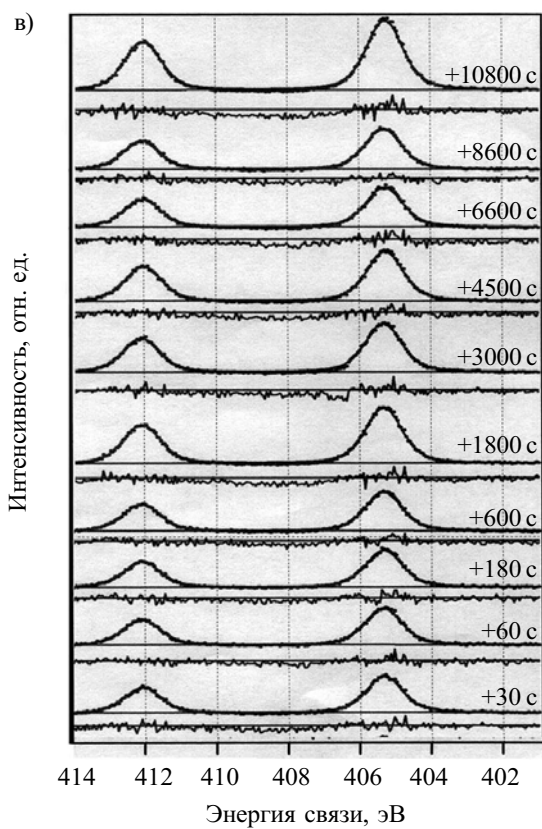
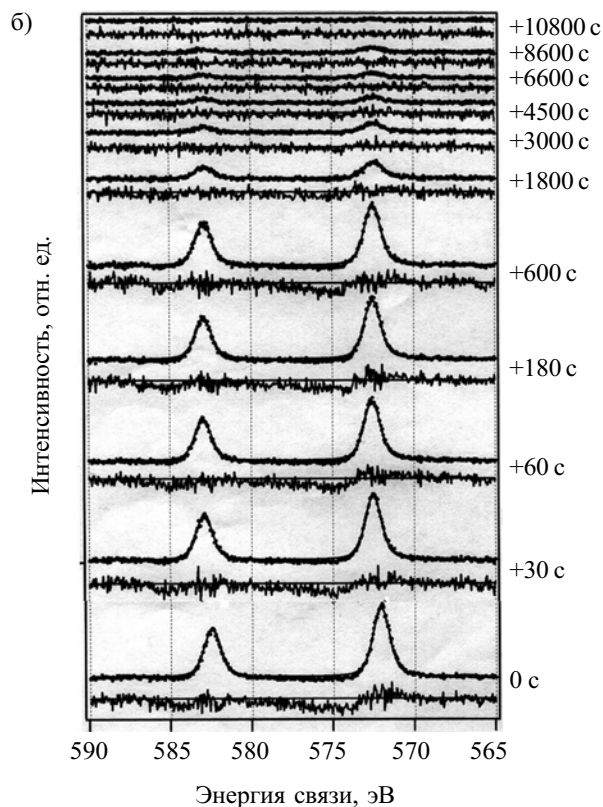
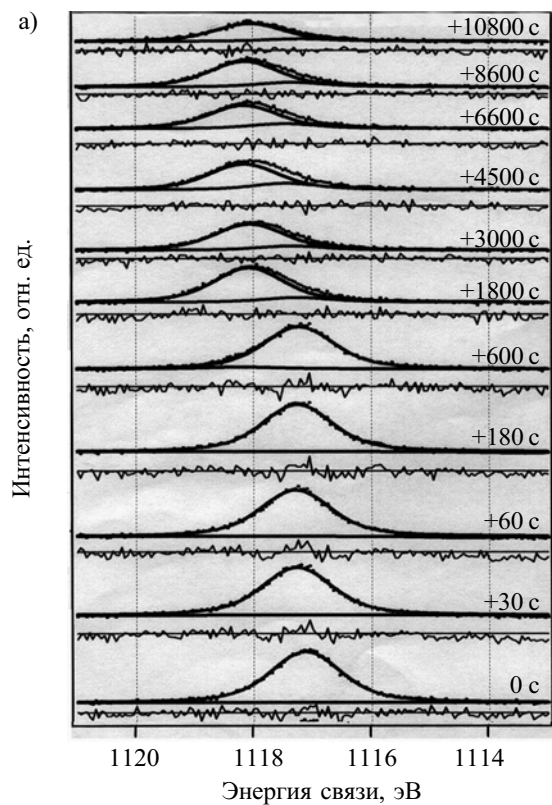
Исследования методом РФЭС проводились на установке РНИ 5700 MultiTechnique. Для возбуждения спектров использовался монохроматический Mg K_{α} -источник ($h\nu=1253,6$ эВ). Энергетическая шкала спектрометра калибровалась исходя из энергии связи уровня золота $E_b(\text{Au } 4f_{7/2})=84,00$ эВ.

Эволюция спектров структуры GaTe/CdSe, полученных методом РФЭС, в зависимости от продолжительности нанесения пленки (в секундах) показана на рисунке. Спектры исходной поверхности (после скальвания) содержат только пики Ga и Te. После эпитаксии CdSe в спектрах появляются пики кадмия и селена.

Спин-орбитальное расщепление уровня Ga $2p$ на $2p_{3/2}$ и $2p_{1/2}$ очень значительно (около 30 эВ), поэтому проанализировать на химический сдвиг можно только один подуровень. Из разложения атомного подуровня Ga $2p_{3/2}$ видно, что объемная составляющая, обусловленная химическими связями Ga–Te, доминирует в спектрах, полученных при толщине нанесенной пленки селенида кадмия (как следует из рис., *a*) до 12 нм. При дальнейшем росте пленки наблюдается резкий химический сдвиг линии в высокоэнергетическую область от 1117,2 до 1118,1 эВ, что, по данным работы [6], соответствует связям Ga–Se. Вообще говоря, присутствие линии Ga $2p_{3/2}$ при таких толщинах пленки может быть объяснено только диффузией галлия из границы раздела с поверхностью, т. е. вследствие большой энергии связи кинетическая энергия фотоэлектронов составляет около 100 эВ, что ограничивает глубину выхода электронов до нескольких нанометров.

Для спектров уровня Te $3d$ (рис., *б*) интенсивность линии уменьшается с толщиной пленки. При толщине пленки около 40 нм линия уже не наблюдается, что полностью коррелирует с глубиной выхода фо-

Работа частично профинансирована Немецкой службой академических обменов (DAAD) (грант No A/04/15854). Автор благодарит специалистов Технического университета г. Дармштадта В. Ягермана и Б. Яскеля за содействие выполнению исследований.



Эволюция фотоэлектронных спектров структуры GaTe/CdSe при эпитаксиальном росте со скоростью 0,02 нм/с: а — спектр уровня Ga $2p_{3/2}$ (гауссианами выделены высокоэнергетическая (соответствует связям Ga-Se) и низкоэнергетическая (соответствует связям Ga-Te) компоненты); б — спектр уровней Te $3d_{5/2}$ и Te $3d_{3/2}$; в — спектр уровней Cd $3d_{5/2}$ и Cd $3d_{3/2}$; г — спектр уровня Se $3d$ (гауссианами показано спин-орбитальное расщепление уровня на $3d_{5/2}$ и $3d_{3/2}$)

тоэлектронов с кинетическими энергиями порядка 0,5 кэВ. Разделяемых химических сдвигов в спектре теллура не обнаружено.

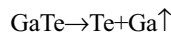
Подобная картина наблюдается и для уровня $3d$ кадмия (рис., в). Интенсивность линии возрастает с толщиной нанесенной пленки, но для толщин пленки больше 100 нм представление спектров однокомпонентными гауссианами уже не идеально со стороны меньших энергий связи. Согласно [7, 8], меньшим энергиям связи для $Cd\ 3d_{5/2}$ соответствует присутствие только металлического кадмия (403,5 эВ). Очень незначительная интенсивность такой эмиссии может быть объяснена постоянным наличием связей $Cd-Se$ селенида кадмия, получаемого из молекулярного пучка.

Для линий $3d$ селена (рис., г), как и для линии галлия, наблюдается существенный химический сдвиг. Характерно, что линии этих двух элементов сдвигаются практически одновременно при толщине пленки около 10 нм, что свидетельствует о формировании селенида галлия.

То есть анализируя результаты РФЭС, можно сделать вывод о присутствии интерфейсных реакций при эпитаксии, причем на первой стадии следует отметить разложение некоторой части подложки с выделением атомарного галлия. В то время, когда линии теллура уже не детектируются, интенсивность линий галлия достаточно велика даже для толщин, на три порядка превышающих глубину выхода соответствующих фотоэлектронов из подложки. Следовательно, галлий диффундирует к поверхности, попутно вступая в реакцию с селенидом кадмия, продуктами которой следует считать металлический кадмий и селенид галлия. Что касается формулы последнего, то мы можем остановиться на полутораселениде галлия, т. к. положение линий галлия и селена очень близко к линиям этой компоненты [6].

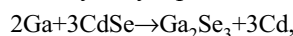
Следует отметить, что разделить компоненты $Ga-Se$ с разной валентностью довольно сложно. К примеру, в работе [9], посвященной исследованиям окисления моноселенида галлия методом РФЭС, полутораселенид галлия обнаружен не был, а в работах [10, 11] его присутствие было детектировано другими методами, такими как рентгеноструктурный анализ и спектроскопия комбинационного рассеяния света.

Таким образом, формирование гетероструктуры $GaTe/CdSe$ методом эпитаксии молекулярным пучком сопровождается двухстадийной интерфейсной реакцией. При толщинах пленки около 10 нм имеет место реакция диссоциации молекул подложки согласно схеме



(стрелка вверх указывает на диффузию атомов галлия к поверхности).

Диффундирующий галлий в свою очередь вызывает следующую реакцию:



т. е. полученная структура характеризуется многокомпонентным составом, причем с присутствием незначительной части металлического кадмия.

В работе методом эпитаксии молекулярным пучком получена перспективная для использования в солнечных элементах структура "теллурид галлия—селенид кадмия" и исследована интерфейсная граница.

Реакционная диффузия галлия к поверхности ухудшает резкость гетерограницы, поэтому в дальнейших работах следует уделить больше внимания технологическим аспектам эпитаксии для улучшения этого параметра.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Dobson K. D., Visoly-Fisher I., Hodes G., Cahen D. Stability of CdTe/CdS solar cells // Solar Energy Mater. Solar Cells.— 2000.— Vol. 62.— P. 295—325.
2. Durose K., Edwards P. R., Halliday D. P. Materials aspects of CdTe/CdS solar cells // J. Cryst. Growth.— 1999.— Vol. 197.— P. 733—742.
3. Jaegermann W., Klein A., Pettenkofer C. Electronic properties of Van der Waals-epitaxy films and interfaces / In: Electron spectroscopies applied to low dimensional materials / H. P. Hughes, H. I. Starnberg (eds.).— Dordrecht: Kluwer.— 2000.— Vol. 24.— P. 317—402.
4. Катеринчук В. Н., Ковалюк М. З. Гетеропереходы на основе $GaTe$ // Письма в ЖТФ.— 1999.— Т. 25, № 2.— С. 29—33.
5. Coskun C., Aydogan S., Efeoglu H. Temperature dependence of reverse bias capacitance-voltage characteristics of Sn/p-GaTe Schottky diodes // Semicond. Sci. Techn.— 2004.— Vol. 19.— P. 242—246.
6. Gillian E. G., Barron A. N. Chemical vapor deposition of hexagonal gallium selenide and telluride films from cubane precursors: understanding and envelope of molecular control // Chem. Mater.— 1997.— Vol. 9.— P. 3037—3048.
7. Нефедов В. И. Рентгеноэлектронная спектроскопия химических соединений.— М.: Химия, 1984.
8. Handbook of X-ray photoelectron spectroscopy / J. Chastian, R. C. Jr. King (eds.).— Minnesota: Physical Electronics Inc., 1995.
9. Iwakuro H., Tatsuyama C., Ishimura S. XPS and AES studies of the oxidation of layered semiconductor $GaSe$ // Jpn. J. Appl. Phys.— 1982.— Vol. 21, N 1.— P. 94—99.
10. Balitskii O. A., Savchyn V. P., Yukhymchuk V. O. Raman investigation of InSe and GaSe single-crystals oxidation // Semicond. Sci. Techn.— 2002.— Vol. 17, N 2.— P. L1—L4.
11. Berchenko N. N., Balitskii O. A., Lutsiv R. V. et al. Characteristics of phase formation during $GaSe$ oxidation // Mater. Chem. Phys.— 1997.— Vol. 51.— P. 125—129.

ВНИМАНИЮ ПОДПИСЧИКОВ

На журнал "Технология и конструирование в электронной аппаратуре" можно (с любого номера) подписаться в редакции по адресу:

Украина, 65005, Одесса, ул. Прохоровская, 45, редакция "ТКЭА";
e-mail: tkea@odessa.net; тел. +38(048) 728-18-50, 728-11-89, тел./факс 728-49-46.

Д. ф.-м. н. В. В. НОВИКОВ, О. А. КОМКОВА, О. В. ЖАРОВА

Украина, Одесский национальный политехнический университет
E-mail: genri@ukr.net

Дата поступления в редакцию
14.02 2005 г.

Оппонент к. ф.-м. н. В. А. БАЛИЦКАЯ
(НПП "Карат", г. Львов)

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ГАВРИЛЯКИ–НЕГАМИ

Впервые построена математическая модель, позволяющая прогнозировать аномальные динамические диэлектрические свойства в неупорядоченных материалах (сегнетоэлектриках, полимерах, композитах и т. п.).

Аномалии динамических диэлектрических свойств являются характерной особенностью разупорядоченных сегнетоэлектриков, полимеров, композитов и других материалов, которые используются в радиоэлектронике. В частности, сильная дисперсия динамической магнитной или диэлектрической восприимчивости наблюдалась во многих спиновых или дипольных стеклах (см., например, [1]). Дисперсия обычно связывается с существованием в разупорядоченных системах широкого спектра времени релаксации, который может быть извлечен из наблюдаемой частотной зависимости восприимчивости [2], например диэлектрического отклика сегнетоэлектрических релаксоров типа $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$, $\text{PbSc}_{1/2}\text{Nb}_{1/2}\text{O}_3$, $\text{Pb}_{1-x}\text{La}_x\text{Zr}_{0,35}\text{Ti}_{0,65}\text{O}_3$ ($x=0,7\dots0,9$) [3–6].

Было показано [1–7], что для описания отличного от дебаевского отклика необходимы различные сложные эмпирические формулы, такие как Кола-Кола, Девидсона–Кола, Гавриляки–Негами и другие.

Эмпирические законы Кола-Кола, Девидсона–Кола, Гавриляки–Негами многие годы применялись для описания релаксационных процессов в обычных стеклах, полимерах, композитах, разупорядоченных сегнетоэлектриках и др. Данные, полученные различными методами, включая диэлектрическую спектроскопию, ядерный магнитный резонанс, квазиупругое рассеяние нейтронов и т. д., успешно описывались («сшивались») с помощью соответствующих формул. Очевидно, однако, что использование функций распределения, извлеченных из наблюдаемого диэлектрического отклика (эксперимента), не позволяет выяснить физическую природу аномалий отклика разупорядоченных систем.

До настоящего времени практически не было расчетов функции распределения времен релаксации в рамках какой-либо физической модели, т. е. не существовало моделей, позволяющих описать диэлектрический отклик, который представляется более сложным, чем простой закон Дебая.

В настоящей работе анализируется математическая модель, которая позволяет описать аномальные динамические диэлектрические свойства и определить функцию распределения времен релаксации, совпадающую с эмпирическим законом Гавриляки–Негами.

Эта статья является продолжением статьи [8], в которой для описания аномальной релаксации Коул-Коула использовался математический язык дробной производной. Аналогично [8], рассмотрим обобщенный оператор дробного дифференцирования

$$(\tau^{-\alpha} + D^{\alpha})^{\nu} = \sum_{n=0}^{\infty} (\tau^{-\alpha})^n \binom{\nu}{n} D^{\alpha(\nu-n)}, \quad (1)$$

где $\binom{\nu}{n} = \frac{\nu!}{n!(\nu-n)!}$ — биномиальный коэффициент и

D^{α} — оператор дробного дифференцирования:

$$D_{0+}^{\alpha} [f(t)] = C \frac{d}{dx} \int_{0+}^x \frac{f(t)}{(x-t)^{\alpha}} dt. \quad (2)$$

В этом случае уравнение, которое описывает релаксационный процесс в диэлектриках, можно записать в виде [8]

$$(\tau^{-\alpha} + D^{\alpha})^{\nu} [P(t)] = \frac{\chi_0 E_0}{\tau^{\alpha\nu}}. \quad (3)$$

Начальное условие уравнения (3) имеет вид: $P(0)=0$.

Согласно (3), Лаплас-образ функции $P(t)$ можно определить в виде

$$\bar{P}(p) = \frac{\chi_0 E}{p} \frac{1}{(1 + (\tau p)^{\alpha})^{\nu}}, \quad \bar{P}(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} P(t) dt. \quad (4)$$

Заменой $p \rightarrow i\omega$ с учетом (4) можно определить комплексную восприимчивость Гавриляки–Негами в виде

$$\chi(i\omega) = \frac{\chi_0}{(1 + (i\omega\tau)^{\alpha})^{\nu}}. \quad (5)$$

Зависимость (5) совпадает с экспериментальным законом Гавриляки–Негами [7]. Отсюда следует, что комплексная диэлектрическая проницаемость

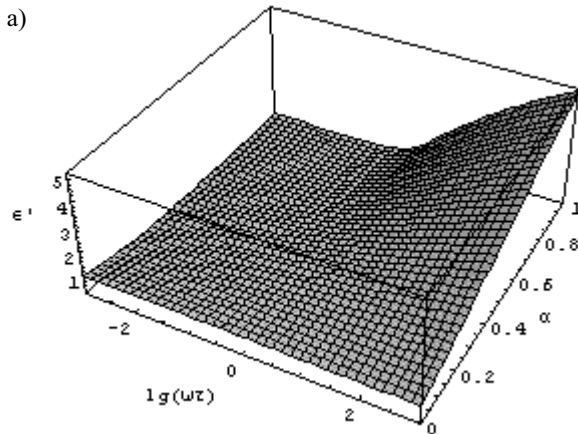
$$\varepsilon^*(i\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{[1 + (i\omega\tau)^\alpha]^\gamma}, \quad (6)$$

где

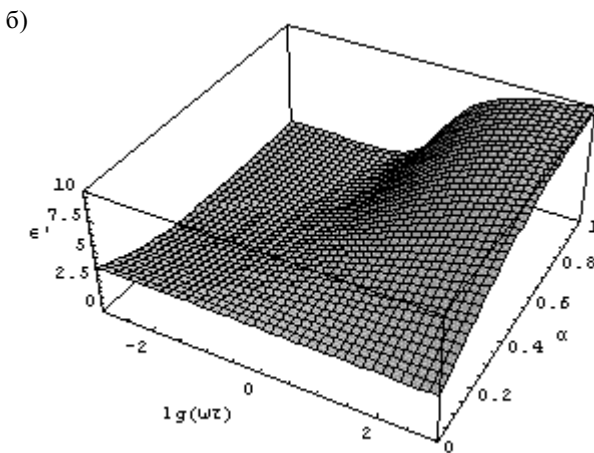
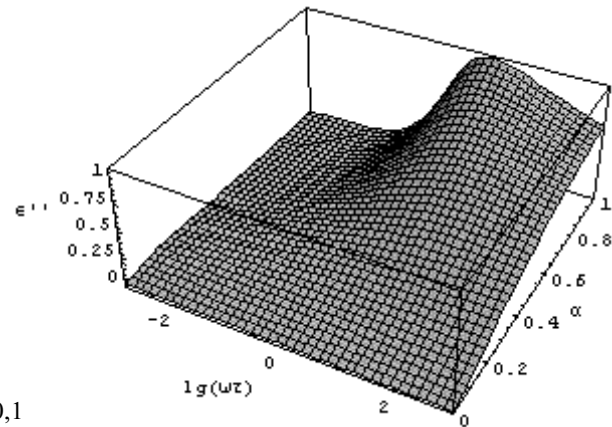
$$\varepsilon'(\omega) = \operatorname{Re}[\varepsilon^*(i\omega)] = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty) \frac{\cos \left[\gamma \operatorname{arctg} \left(\frac{\sin \frac{\alpha\pi}{2} (\omega\tau)^\alpha}{1 + \cos \frac{\alpha\pi}{2} (\omega\tau)^\alpha} \right) \right]}{\left(1 + (\omega\tau)^{2\alpha} + 2(\omega\tau)^\alpha \cos \frac{\alpha\pi}{2} \right)^{\frac{\gamma}{2}}}; \quad (7)$$

$$\varepsilon''(\omega) = \operatorname{Im}[\varepsilon^*(i\omega)] = (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty) \frac{\sin \left[\gamma \operatorname{arctg} \left(\frac{\sin \frac{\alpha\pi}{2} (\omega\tau)^\alpha}{1 + \cos \frac{\alpha\pi}{2} (\omega\tau)^\alpha} \right) \right]}{\left(1 + (\omega\tau)^{2\alpha} + 2(\omega\tau)^\alpha \cos \frac{\alpha\pi}{2} \right)^{\frac{\gamma}{2}}}. \quad (8)$$

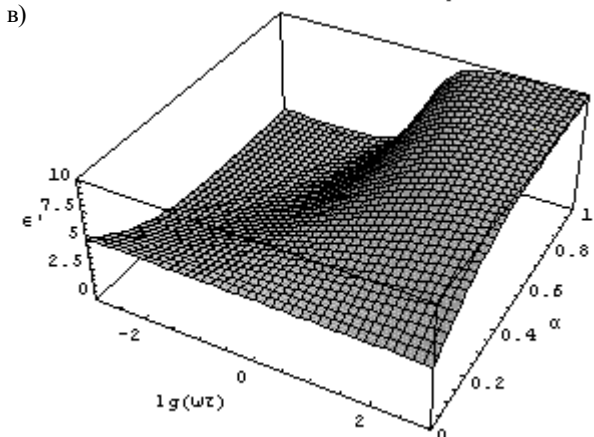
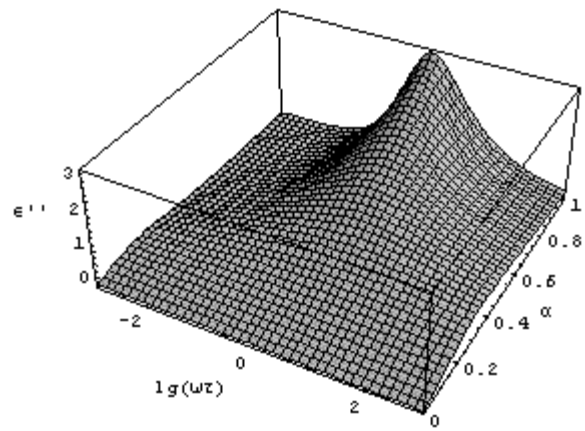
Расчеты, результаты которых показаны на рисунке, проводились при $\eta = \varepsilon_\infty/\varepsilon_0 = 10$.



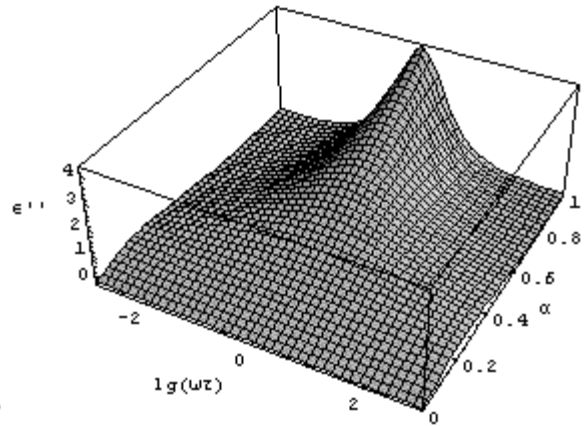
$\gamma=0,1$



$\gamma=0,5$



$\gamma=0,9$



Комплексная диэлектрическая проницаемость закона Гавриляки—Негами при $\gamma=0,1$ (а), $\gamma=0,5$ (б), $\gamma=0,9$ (в): слева — действительная часть; справа — мнимая часть

Осуществляя переход от изображения (4) к оригиналу, получим решение уравнения (3), которое описывает релаксацию диэлектрика, совпадающую с экспериментальным законом Гавриляки–Негами:

$$P(t) = -\frac{1}{\Gamma(\gamma)} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k \Gamma(k+\gamma)}{\Gamma(\alpha k + \alpha\gamma) \Gamma(k+1)} \left(\frac{t}{\tau}\right)^{\alpha(k+\gamma)},$$

$$0 < \alpha < 1, 0 < \gamma < 1. \quad (9)$$

То есть для релаксации Гавриляки–Негами зависимость поляризации диэлектрика $P(t)$ от времени имеет вид (9).

При $\gamma=1$ зависимость (9) переходит в закон релаксации Коул–Коула, а при $\alpha=1$ — в закон Коул–Девидсона. Исходя из этого можно сделать вывод, что оператор (1) есть обобщающий оператор дробного дифференцирования.

Таким образом, впервые построена математическая модель (дифференциальное уравнение с дробными производными), которая описывает релаксацию Гавриляки–Негами в диэлектриках.

Полученное решение дифференциального уравнения с дробными производными позволяет прогнозировать аномальные динамические диэлектрические

свойства в неупорядоченных материалах (сегнетоэлектриках, полимерах, композитах и т. п.).

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Коренблит И. Я., Шендер Е. Ф. Спиновые стекла и неэргодичность // УФН.— 1989.— Т. 157, № 2.— С. 267—274.
2. Colla E. V., Koroleva E. Yu., Okuneva N. M., Vakhrushev S. B. Low-frequency dielectric response of $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ // J. Phys.: Cond. Matter.— 1992.— Vol. 4.— P. 3671.—3679.
3. Glinchuk M. D., Stephanovich V. A., Hilczler B. et al. Peculiarities of dielectric response of 1:1 family relaxors // Ibid.— 1999.— Vol. 11.— P. 6263—6271.
4. Glinchuk M. D., Stephanovich V. A. Theory of the nonlinear susceptibility of relaxor ferroelectrics // Ibid.— 1998.— Vol. 10.— P. 11081—11084.
5. Glinchuk M. D., Stephanovich V. A. Random fields and their influence on the phase transitions in disordered ferroelectrics // Ibid.— 1994.— Vol. 6.— P. 6317—6319.
6. Glinchuk M. D., Farhi R., Stephanovich V. A. Theory of phase transitions in disordered ferroelectrics allowing for nonlinear and spatial correlation effects // Ibid.— 1997.— Vol. 9.— P. 10237—10243.
7. Jonsher A. K. Dielectric relaxation in solids.— London: Chelsea Dielectric, 1983.
8. Новиков В. В., Комкова О. А. Диэлектрическая релаксация Коул–Коула // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2004.— № 5.— С. 61—64.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

К СВІТ 2005
ЕЛЕКТРОНІКИ

Украина, Киев
9-12 ноября 2005

**Мир
на кончиках пальцев**

**8-я международная специализированная выставка
электронных компонентов и комплектующих
«Мир электроники 2005»**
www.presto.kiev.ua

Оргкомитет выставки — ООО «PrestoExpo»
03062, Украина, г. Киев, ул. Чистяковская, 2, оф. 11
тел/факс: +38 (044) 449-94-76, 443-73-50
e-mail: info@presto.kiev.ua www.presto.kiev.ua



Аппаратура ВЧ-связи АВС1-ЦМ

Аппаратура высокочастотной связи по ЛЭП одноканальная цифровая АВС1-ЦМ — новый этап в развитии оборудования передачи информации по воздушным линиям (ВЛ) высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП). Благодаря применению сигнальных процессоров, ПЛИС и современной элементной базы удалось приемопередающий тракт и цифровую обработку сигналов реализовать программным путем.

Аппаратура предназначена для организации в электроэнергетике внутриведомственных дуплексных каналов телефонной связи, каналов телемеханики для передачи сигналов контроля и управления энергетическими объектами, а также каналов передачи данных (ММО).

Обеспечивает цифровой (ВРК) режим работы на основе временного уплотнения (технология TDM) и — в качестве резерва в случае некондиционности ВЧ-тракта — аналоговый (ЧРК) на основе частотного уплотнения (технология FDM, по МЭК 60495).

Выпускается в варианте АВС1-ЦМ ПИСТ.465411.011 для организации канала связи в полосе частот 4 кГц, имеет сертификат соответствия Ростеста по ТБ и ЭМС.

Обеспечивает адаптацию по скорости передачи цифрового потока в диапазоне скоростей от 19,2 до

6,4 Кбит/с в зависимости от соотношения сигнал/помеха в ВЧ-тракте с реализацией приоритетов по каналам телефон (ТЛФ), телемеханика (ТМ), межмашинный обмен (МПО, АПД).

Обеспечивает в режиме ЧРК один канал передачи и приема сигнала в полосе 0,3—3,7 кГц.

Работает в режиме, когда передача и прием осуществляются на разных полосах частот (FDD).

Обеспечивает работу со сближенными (сомкнутыми) или разнесенными номинальными полосами частот передачи (Tx) и приема (Rx).

Обеспечивает работу в разнесенном варианте по высокой частоте с затуханием соединительной линии до 2 дБ между кассетами ВЧП и Выход.

Применение временного разделения каналов (TDMA) имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с технологией вторичного частотного уплотнения каналов (FDMA), в том числе по цене канала связи. В таблице приводятся сравнительные возможности аппаратуры АВС-ЦМ и выпускаемой в настоящее время аппаратуры ВЧ-связи с использованием аналогового метода передачи и вторичного частотного уплотнения каналов.

Основные возможности и технические характеристики	Аппаратура ВЧ-связи с аналоговым методом передачи	АВС-ЦМ
1. Технология передачи информации	FDMA(ЧРК)	TDMA(ВРК) FDMA(резерв)
2. Виды передаваемой информации в полосе ВЧ-канала 4 кГц, аппаратура многоканальная	ТЛФ+ТМ	ТЛФ+ТМ+ПД(ММО)
3. Использование полосы ВЧ-канала с шириной 4 кГц на НЧ-окончании аппаратуры	Прозрачный аналоговый канал в полосе 0,3—3,7 кГц	Два ТЛФ-канала на базе вокодера G.729D ITU-T, два канала ТМ, один канал ММО
4. Экономия спектра в ВЧ-канале	—	Более чем в 2 раза
5. Соответствие МЭК 495	Да	Да
6. Работа по протоколу АДАСЭ	Да	Да

Сравнительный расчет аналогового и цифрового каналов*

Технология передачи информации по ВЧ-каналу	Ширина ВЧ-канала, кГц	Количество ТЛФ-каналов	Частота среза ТЛФ, Гц	Скорость цифрового потока, Кбит/с	Количество каналов ТМ	Передача данных, Кбит/с	Мощность в ВЧ-тракте, дБм	Перекрываемое затухание, дБм	Затухание ВЧ-тракта, дБ	Расчетный запас, дБ
FDMA	4	1	2400	—	до 4	—	43	47	25	22
FDMA	8	2	2400	—	до 8	—	38	42	25	17
TDMA	4	2	3400	16,0	2	0,8	37	41	25	16

*Исходные данные:

ЛЭП — 220 кВ с затуханием в полосе рабочих частот 25 дБ, уровнем помех в полосе пропускания $f=4$ кГц — минус 30 дБм;

выходная мощность аппаратуры АВС-ЦМ — 40Вт (46 дБм);

перекрываемое затухание и запас рассчитываются для соотношения сигнал/шум (SNR) 26 дБ.

Расчет показывает возможность увеличения общей скорости цифрового потока до 19,2 Кбит/с и передачи данных до 4,0 Кбит/с.

Дополнительную информацию по аппаратуре АВС1-ЦМ смотри на сайте
<http://tkea.wallst.ru/elektroniks.html> («Украинский проспект электроники»)



Открытое акционерное общество
«Нептун»

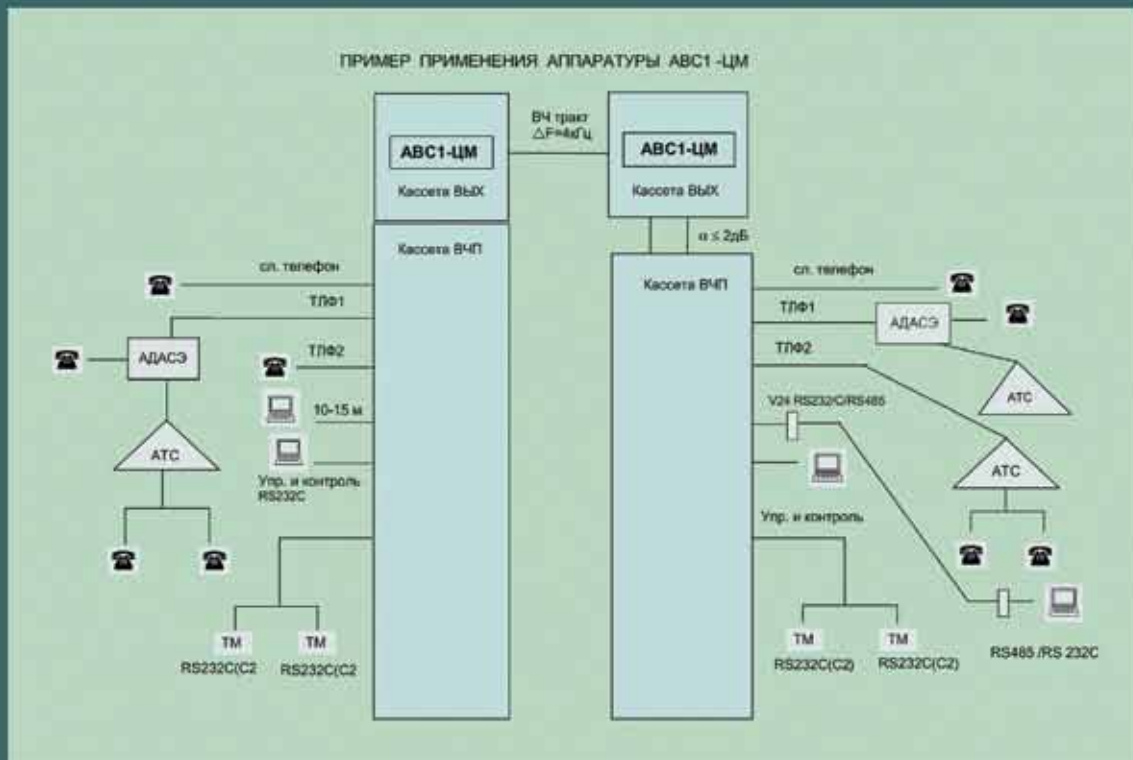
Украина
65031, г. Одесса -31,
ул. Промышленная, 28

Телефон: (048)721-48-37
тел./факс: (048)732-35-23,
(0482)39-67-90

Кассета Вых



Кассета ВЧП



Пишите

Подписывайтесь

Читайте



Номер готовили Арзамас, Вишневое,
Днепропетровск, Донецк, Киев, Львов, Москва,
Одесса, Санкт-Петербург, Севастополь, Симла,
Таганрог, Харьков, Херсон, Черновцы.