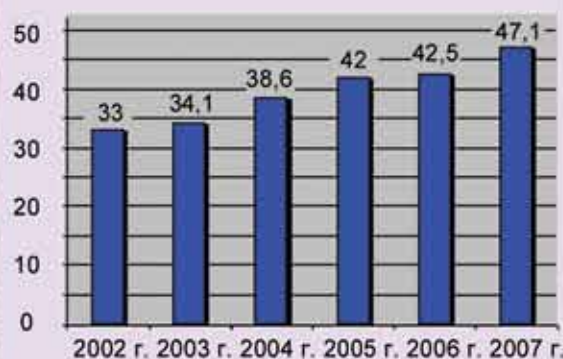
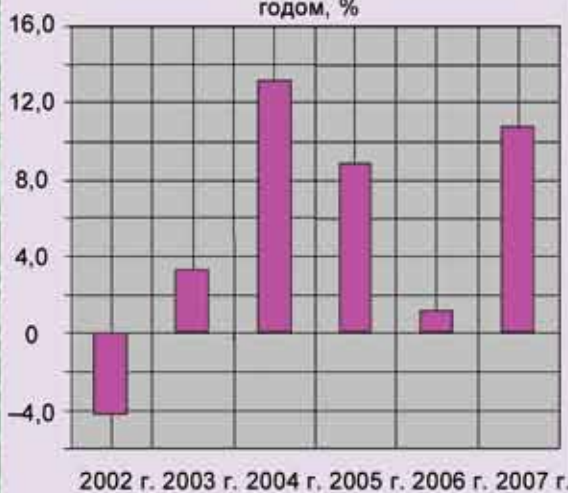


# ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ

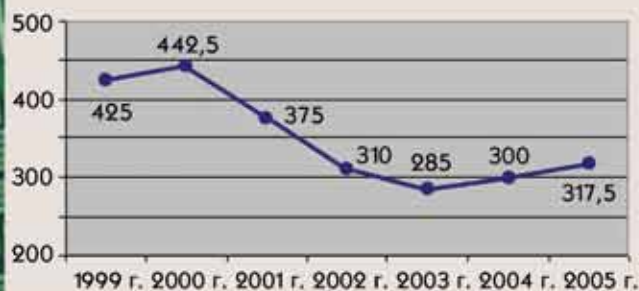
Производство печатных плат в мире, млрд. \$



Изменения в сравнении с предыдущим годом, %



К статье  
«Обзор мирового  
рынка печатных плат»



Производство печатных плат в России, млн. \$



Деление производителей печатных плат по регионам в 2005 г.

# 1(61) 2006

ЯНВАРЬ – ФЕВРАЛЬ



7-я МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

# «СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

22—26 мая 2006 года  
Украина, г. Одесса

- ◆ Прогрессивные информационные технологии и системы искусственного интеллекта
- ◆ Автоматизированные компьютерные системы
- ◆ Радиотехнические, телекоммуникационные и телевизионные системы
- ◆ Экологический мониторинг

- ◆ Проектирование, конструирование, производство и контроль электронных средств
- ◆ Функциональная электроника. Микро- и нанотехнологии
- ◆ Проблемы подготовки квалифицированных инженерных кадров в области радиоэлектроники и компьютерных систем

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

Реквизиты для связи  
E-mail <[tkea@optima.com.ua](mailto:tkea@optima.com.ua)>  
тел./факс +38 (048) 728-49-46,  
тел. +38 (048) 728-18-50.  
Секретарь Оргкомитета «СИЭТ-2006»  
Хлопова Маргарита

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

### ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ



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

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

Редакция: Е. А. Тихонова, А. А. Ефименко, Л. М. Лейдерман,  
А. Н. Овощенко, М. С. Назарова.

Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.  
Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корецкая.

В 2005 году журнал поддерживали:  
Министерство промышленной  
политики Украины,  
НПП «Сатурн»,  
ЗАО «Укрналит»,  
Компания «Сатурн Дейта  
Интернешенл» (г. Киев),  
НПП «Карат» (г. Львов),  
Одесский национальный  
политехнический университет,  
СКБ «Молния», (г. Одесса),  
ЦКБ «Ритм» (г. Черновцы)

Подписано к печати 15.02 2006 г. Формат 60×84 1/8.  
Печать офсетная. Печ. л. 7,5. Уч.-изд. л. 9,3. Тираж 500 экз. Заказ № 41.  
Издательство «Нептун-Технология»  
(65005, г. Одесса, ул. Прохоровская, 45).  
Отпечатано в типографии издательства «ТЭС»  
(65012, г. Одесса, ул. Канатная, 81/2).

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ**

Год издания 30-й

Год регистрации 1992

Регистрационный номер  
КВ 2092 от 07.06.96 г.

Зарегистрирован в ВАК по разделам  
"Физико-математические науки",  
"Технические науки"

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР  
К.т.н. В. М. Чмиль

**РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**

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

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

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

**УЧРЕДИТЕЛИ**

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

**СОДЕРЖАНИЕ**

<b>Электронные средства: исследования, разработки</b>	
Прибор «Регион» для космического эксперимента «Кольцо» на борту МКС. <i>Н. А. Барабанов, Л. М. Бандуристый, Ю. И. Венедиктов, С. Г. Довгаль, Ю. А. Селиванов, О. К. Черемных, В. В. Безруких, Г. Л. Гдалевич</i>	3
Алгоритм проектирования РЭС с многоуровневым электромон- тажом с учетом электромагнитной совместимости. <i>И. С. Кондра- шенков</i>	7
<b>Системы передачи и обработки сигнала</b>	
Физическая модель акустооптического процессора цифровой обра- ботки сигналов. <i>А. Ю. Липинский, А. Н. Рудякова, В. В. Данилов</i>	9
<b>Техника сверхвысоких частот</b>	
Системы охранной сигнализации на основе электромагнитного потока СВЧ-сигнала и фазообразующих средств. <i>Г. М. Виноградов, В. В. Смаглюк, К. В. Колесник</i>	13
<b>Энергетическая электроника</b>	
Моделирование термозооптического генератора с низкотемпера- турным источником тепла. <i>Л. Т. Струтинская, В. Я. Михайлов- ский, Е. В. Чайковская</i>	15
<b>Вопросы приборостроения</b>	
Осветительный канал цифрового оптического микроскопа на базе диффузного излучателя. <i>Л. А. Михеенко, В. Н. Боровицкий</i>	20
Пьезоэлектрический ионизатор воздуха с плавной регулировкой производительности. <i>Ю. Э. Паэранд, О. И. Захожай</i>	28
<b>Сенсорная электроника</b>	
Гальваномагнитные микродатчики положения на базе германие- вого микропровода. <i>Е. А. Алейников, Е. Я. Бадинтер, А. М. Иойшер, Н. И. Лепорда, А. Т. Рыбалка</i>	31
Газочувствительные структуры «силицид кобальта—пористый кремний—кремний». <i>И. В. Белоусов, Е. В. Бузанева, Г. В. Кузнецов</i>	34
<b>Технологические процессы и оборудование</b>	
Обзор мирового рынка печатных плат. <i>С. В. Ионин</i>	37
Информационная технология чтения маркировочных надписей компонентов печатных узлов. <i>В. Н. Антощук, С. Г. Крылов, Г. Ю. Щербакова</i>	40
Система фотометрического контроля скорости травления тонких диэлектрических пленок. <i>С. Э. Семенова, Э. И. Семенов</i>	43
<b>Материалы электроники</b>	
Компьютерное моделирование проводимости композитов с хаотической структурой. <i>В. В. Новиков, Е. А. Нежевенко</i>	46
Низкотемпературная модификация медных пленок под воздей- ствием атомарного водорода. <i>Е. Л. Жавжаров, В. М. Матюшин</i>	50
<b>Метрология. Стандартизация</b>	
Влияние нестабильности потока излучения ртутных ламп на калиб- ровку приборов. <i>И. В. Докторович, И. М. Фодчук, В. К. Бутенко, В. Н. Годованюк, В. В. Рюхтин, В. Г. Юрьев</i>	54
<b>Библиография</b>	
Указатель статей, опубликованных в 2005 г.	57
Рекомендации авторам по подготовке рукописи	60
Новые книги	45, 53
В портфеле редакции	19
<b>Выставки. Конференции</b>	19, 28

## 2006 № 1 (61)

## ЗМІСТ

**Електронні засоби: дослідження, розробки**  
Прилад «Region» для космічного експерименту «Кільце» на борту МКС. *Барабанов М. О., Бандуристий Л. М., Венедиктов Ю. І., Довгаль С. Г., Селіванов Ю. О., Черемних О. К., Безрукіх В. В., Гдалевич Г. Л.* (3)

Алгоритм проектування РЕС з багаторівневим електромагнітним з урахуванням електромагнітної сумісності. *Кондрашенков І. С.* (7)

**Системи передачі та обробки сигналу**  
Фізична модель акустооптичного процесора цифрової обробки сигналів. *Ліпінський О. Ю., Рудякова Г. М., Данилов В. В.* (9)

**Техніка надвисоких частот**  
Системи охоронної сигналізації на основі електромагнітного потоку НВЧ-сигналу та фазоуворюючих засобів. *Виноградов Г. М., Смаглюк В. В., Колесник К. В.* (13)

**Енергетична електроніка**  
Моделювання термоелектричного генератора з низькотемпературним джерелом тепла. *Струтинська Л. Т., Михайловський В. Я., Чайковська О. В.* (15)

**Питання приладобудування**  
Освітлювальний канал цифрового оптичного мікроскопа на базі дифузного випромінювача. *Міхєєнко Л. А., Боровицький В. М.* (20)  
Пієзоелектричний іонізатор повітря з плавним регулюванням продуктивності. *Паєранд Ю. Е., Захожай О. І.* (28)

**Сенсоелектроніка**  
Гальваномагнітні мікродатчики положення на базі германієвого мікропроводу. *Алейніков С. А., Бадінтер С. Я., Іоїшер А. М., Лепорда М. І., Рибалка А. Т.* (31)

Газочутливі структури «сіліцида кобальту—пористий кремній—кремній». *Белозов І. В., Бузанєва С. В., Кузнєцов Г. В.* (34)

**Технологічні процеси та обладнання**  
Огляд світового ринку друкованих плат. *Іонін С. В.* (37)

Інформаційна технологія читання маркувальних надписів компонентів друкованих вузлів. *Антошчук С. Г., Крилов В. М., Шербаківа Г. Ю.* (40)  
Система фотометричного контролю швидкості травлення тонких діелектричних плівок. *Семенова С. Е., Семенов Е. І.* (43)

**Матеріали електроніки**  
Комп'ютерне моделювання провідності композитів з хаотичною структурою. *Новиков В. В., Нєжевенко С. О.* (46)

Низькотемпературна модифікація мідних плівок під впливом атомарного водню. *Жавсаров С. Л., Матюшин В. М.* (50)

**Метрологія. Стандартизація**  
Вплив нестабільності потоку випромінювання ртутних ламп на калібрування приладів. *Докторович І. В., Фодчук І. М., Бутенко В. К., Годованюк В. М., Рєхтін В. В., Юр'єв В. Г.* (54)

## CONTENT

**Electronic means: investigations, development**  
The «Region» device for the «Ring» space experiment on the ISS board. *Barabanov N. A., Banduristy L. M., Venediktov Yu. I., Dovgal S. G., Selivanov Yu. A., Cheremnykh O. K., Bezrukikh V. V., Gdalevich G. L.* (3)

Quality factors analysis of electromagnetic compatibility of automated control system electronics algorithm. *Kondrashenkov I. S.* (7)

**Systems of transfer and processing of a signal**  
Physical model of acoustooptical digital signal processor. *Lipinskii A. Yu., Rudakova A. N., Danilov V. V.* (9)

**Microwave engineering**  
Systems of the security signal system on the basis of an electromagnetic flow of a microwave-signal and phase generating means. *Vinogradov G. M., Smaglyuk V. V., Kolesnik K. V.* (13)

**The energy electronics**  
Modeling of thermoelectric generator with a low-grade heat source. *Strutinskaya L. T., Mikhailovsky V. Ya., Chaikovskaya E. V.* (15)

**The questions of instrument making**  
Illumination channel of digital light microscope based on diffusive light source. *Mikheenko L. A., Borovytsky V. N.* (20)

Piezoelectric ionizer of air with smooth of productivity regulation. *Paerand Yu. E., Zahozhay O. I.* (28)

**Sensoelectronics.**  
Galvanomagnetic position micro-gauges based on germanium microwire. *Aleynikov E. A., Badinter E. Ya., Ioisher A. M., Leporda N. I., Ribalka A. T.* (31)

Sensing to gases of structures silicide cobalt—porous silicon—silicon. *Belousov I. V., Buzaneva E. V., Kuznetsov G. V.* (34)

**Technological processes and development**  
The review of printed circuit boards market. *Ionin S. V.* (37)

The informational technology for symbols reading of printed circuit board. *Antoshchuk S. G., Krylov V. N., Shcherbakova G. Yu.* (40)

Photometric monitoring of etching rate of thin dielectric films. *Semenova S. E., Semenov E. I.* (43)

**Materials of electronics**  
Computer modelling of conductivity of composites with chaotic structure. *Novikov V. V., Nezevenko E. A.* (46)  
Low temperature modification of copper layer under the influence of atomic hydrogen. *Zhavzharov E. L., Matyushin V. M.* (50)

**Metrology. Standardization**  
THE investigation of hydrogen lamps radiation spectral distribution instability. *Doctorovych I. V., Fodchuk I. M., Butenko V. K., Godovaniouk V. M., Ryukhtin V. V., Yuryev V. H.* (54)

**Уважаемый Читатель!**  
Этим номером журнал вступает в 30-й год своего существования.

Ветераны радиоэлектроники должны помнить очередную реорганизацию Минрадиопрома СССР, когда было образовано Министерство промышленности средств связи. Новый информационный центр НИИ «ЭКОС» организовал тогда издание отраслевого научно-технического сборника «Техника средств связи» («ТСС») по нескольким тематическим сериям. Одну из них — серию «Технология производства и оборудование» («ТПО») вел московский Центральный научно-исследовательский технологический институт (ЦНИТИ).

Вот тогда по инициативе директора одесского Научно-исследовательского технологического института «Темп» В. С. Доброера институту было поручено подключиться к ЦНИТИ по изданию серии. Решение было принято в 1976 г., а в 1977 г., вслед за московским выпуском сборника № 1, вышел в свет выпуск № 2 — первый сборник одесской редакции.

В 1991 г. были выпущены номера 1, 2 и 3 — одесские, номер 4 — московский. Это был последний год, когда одесские выпуски выходили в статусе сборника. На 1992 г. НИИ «ЭКОС» объявлял подписку уже не только на сборник ТСС-ТПО (Москва), но и на журнал «Технология и конструирование в электронной аппаратуре» («ТКЭА») — так теперь называлось одесское издание.

Подписку на журнал «ТКЭА» объявил и каталог «Союзпечати»: «ТКЭА» был тогда первым (и долго — единственным) отраслевым изданием с подпиской через общедоступный каталог.

Теперь журнал вступает в свой тридцатый год, и редакции было бы интересно получить отзывы о журнале от тех, для кого он делается, — от читателей.

Надеемся!

Редакция

Н. А. БАРАБАНОВ, Л. М. БАНДУРИСТЫЙ, Ю. И. ВЕНЕДИКТОВ, С. Г. ДОВГАЛЬ,  
к. ф.-м. н. Ю. А. СЕЛИВАНОВ, д. ф.-м. н. О. К. ЧЕРЕМНЫХ,  
к. ф.-м. н. В. В. БЕЗРУКИХ, д. ф.-м. н. Г. Л. ГДАЛЕВИЧ

Украина, г. Одесса, СПКБ «Дискрет», г. Киев, Институт космических исследований;  
Россия, г. Москва, Институт космических исследований  
E-mail: nikolay@diskret.opu.odessa.ua

Дата поступления в редакцию  
28.11 2005 г.

Оппонент к. т. н. В. И. КОРЖОВ  
(СКБ «Молния», г. Одесса)

## ПРИБОР «РЕГИОН» ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА «КОЛЬЦО» НА БОРТУ МКС

*Описывается прибор для измерения времени пролета ионов от инжектора до детектора в ходе проведения активно-го космического эксперимента «Кольцо» в ионосфере Земли.*

На российском сегменте международной космической станции (МКС) планируется провести космический эксперимент (КЭ) «Кольцо», целью которого является создание высокочувствительных и помехоустойчивых средств измерений электромагнитных флуктуаций в ионосфере Земли, вызываемых процессами, происходящими в земной коре накануне и во время землетрясений, а также другими катаклизмами естественного и искусственного происхождения [1].

КЭ «Кольцо» является активным экспериментом, т. е. в ходе его проведения осуществляется инжекция в ионосферу Земли ионных пучков и их регистрация на борту МКС с помощью детектора, отнесенного от инжектора на определенное расстояние.

В основе эксперимента «Кольцо» лежит зависимость времени пролета ионов от угла оси инжектора относительно силовых магнитных линий Земли, массы ионов, энергии ионов, напряженности электрического поля и индукции магнитного поля Земли. В результате, измерив время пролета ионов от инжектора до детектора, можно получить информацию о параметрах магнитного поля Земли вдоль орбиты МКС.

В задачи КЭ «Кольцо» входят:

- изучение динамики ионных пучков в ионосфере Земли;
- исследование механизмов пучково-плазменного взаимодействия и процессов, протекающих в космической плазме в ходе проведения активных экспериментов;
- обработка методики определения индукции магнитного поля Земли по данным о времени пролета ионов от инжектора до детектора.

Инжекция ионных пучков при проведении КЭ «Кольцо» будет осуществляться поперек силовых магнитных линий магнитного поля Земли. При этом ионы должны двигаться по спиралям вокруг силовых линий в направлении, противоположном вектору индукции магнитного поля, и вращаться против часовой стрелки.

В качестве инжектора для КЭ «Кольцо» предполагается использовать импульсный источник ионов ксенона или дейтерия.

Для регистрации импульсов потока инжектируемых ионов на определенном расстоянии от инжектора и измерения времени пролета ионов от инжектора до детектора предлагается использовать прибор «Регион», который, кроме регистрации ионов, позволяет регистрировать электроны и измерять их время пролета. То есть прибор работает в двух режимах — регистрации ионов и регистрации электронов. Последний режим используется при наземной отработке прибора.

Структурная схема прибора «Регион» приведена на рис. 1. Прибор состоит из детектора ионов и электронов (ДИЭ) и блока электроники.

ДИЭ предназначен для регистрации импульсов потока инжектируемых ионов или электронов (в зависимости от режима работы прибора). В качестве



Рис. 1. Структурная схема прибора «Регион»

ДИЭ может быть использован плоский анализатор с тормозящим потенциалом (АТП) или полусферический электростатический анализатор. В качестве детектирующего элемента обоих типов анализаторов используется плоский коллектор, ток которого пропорционален потоку частиц, прошедших через анализатор. Ниже рассматривается вариант прибора с АТП, обычно используемый для измерения параметров ионосферной плазмы [2]. Например, аналогичный АТП использовался в комплексе «Альфа-3» на борту Аврорального и Хвостового зондов проекта «Интербол» [3].

Блок электроники прибора обеспечивает:

- питание ДИЭ в зависимости от режима регистрации ионов или электронов;
- измерение амплитуды (максимума) импульса тока частиц на коллектор ДИЭ;
- измерение времени пролета частиц от инжектора до ДИЭ;
- формирование информации об измерениях и выдачу ее на телеметрическую систему через последовательный интерфейс в стандарте RS-232;
- питание собственной электроники.

ДИЭ располагается на наружной поверхности МКС, а блок электроники — внутри гермоотсека. Расстояние между ДИЭ и блоком электроники может достигать 10 м.

Принцип измерений, реализуемый в приборе «Регион», поясняет рис. 2, где показан реальный импульс тока коллектора ДИЭ при регистрации инжектируемых частиц (электронов). Нулевой отсчет времени  $t$  соответствует моменту начала инжекции. Первый (маленький) пик вызван помехой от высоковольтного разряда в инжекторе. Второй (основной) пик вызван инжектируемыми частицами, образующимися в результате ионизации после разряда.

В принципе форма основного импульса обусловлена распределением инжектируемых частиц по скоростям. Кроме направленной скорости пучка, имеется тепловая составляющая скорости частиц, распределенная по закону Максвелла. Пик импульса вызван частицами, имеющими наиболее вероятную скорость движения от инжектора до детектора. Фронты основного

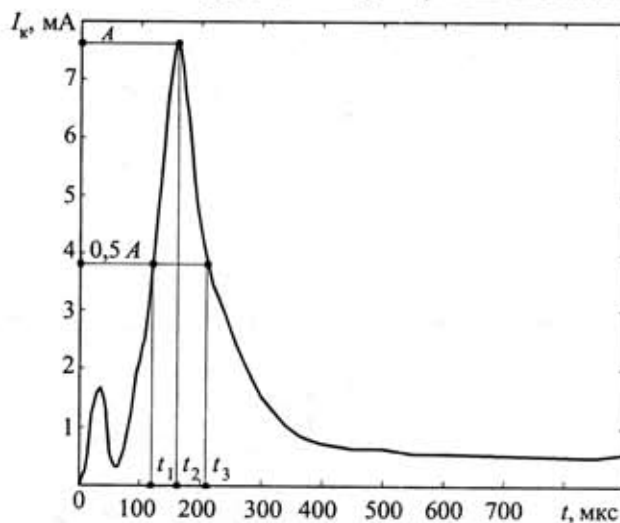


Рис. 2. Импульс тока коллектора ДИЭ при регистрации электронной компоненты инжектируемой плазмы

импульса вызваны наличием тепловой скорости частиц. Кроме «теплого» движения частиц, на крутизну фронтов влияет длина пути пролета частиц, зависящая от параметров магнитного поля Земли. Таким образом, время пролета инжектируемых частиц от инжектора до детектора можно определить только как время между пиком импульса на выходе инжектора и пиком основного импульса, принятого ДИЭ.

Для получения информации о движении частиц от инжектора до детектора в приборе «Регион» для каждого периода инжекции измеряются следующие параметры основного импульса тока коллектора  $I_k$  ДИЭ:

- амплитуда  $A$ ;
- время основного пика  $t_2$  (фактически время пролета частиц);
- отсчеты времени  $t_1$  и  $t_3$ , когда передний и задний фронты импульса пересекают уровень 0,5 от амплитуды  $A$ .

Так как формирование порогового уровня 0,5  $A$  для текущего периода инжекции в реальном времени проблематично, то в качестве оценки амплитуды в текущем периоде инжекции используется величина амплитуды, измеренная в предыдущем периоде. То есть величина искомого порога может отличаться от 0,5  $A$  в зависимости от изменения амплитуды импульсов от периода к периоду. Поэтому результат измерений для текущего периода инжекции дополняется амплитудой импульса в предыдущем периоде.

Следует уточнить, что момент начала отсчета временных интервалов импульса в приборе «Регион» задается логическим импульсом инжекции, поступающим с блока питания инжектора. Этот импульс формируется из сигнала контрольного детектора, установленного на выходе инжектора.

Конструктивно ДИЭ напоминает электронную лампу без накала и катода и состоит из металлического цилиндрического корпуса, в котором смонтированы система из четырех сеток и плоский коллектор. Первая и третья сетки экранирующие. Они соединены с корпусом ДИЭ. Вторая сетка называется «тормозящей». Она позволяет производить отсечку частиц по энергии. Четвертая сетка, расположенная перед коллектором, называется «супрессорной». Она предназначена для подавления фото- и вторичной электронной эмиссии с коллектора. Ток коллектора определяется потоком частиц, прошедших систему сеток. В зависимости от знака и величины напряжений на электродах ДИЭ регистрирует ионы или электроны (см. табл. 1).

Высокое напряжение (180 В) тормозящей сетки ДИЭ обеспечивает отсечку фоновых частиц окружающей ионосферной плазмы. Отрицательное смещение (-30 В) супрессорной сетки относительно кол-

Таблица 1  
Напряжение на электродах ДИЭ относительно корпуса МКС

Электрод	Обозначение напряжения	Величина напряжения, В	
		Ионы	Электроны
Тормозящая сетка	$U_T$	+180	-180
Супрессорная сетка	$U_{CC}$	-40	+10
Коллектор	$U_K$	-10	+40
Корпус, экранирующие сетки	$\perp$	0	0

лектора обеспечивает подавление фототока и тока вторичной электронной эмиссии с коллектора.

Конструктивно блок электроники выполнен в виде прямоугольного алюминиевого блока, внутри которого установлены печатные платы с электроникой. На передней панели блока расположены разъемы для подключения ДИЭ, питания, телеметрии и управления.

В блок электроники входят:

- преобразователь «ток—напряжение» (ПТН);
- аналого-цифровой преобразователь (АЦП);
- процессор;
- интерфейс;
- тактовый генератор (ТГ) на 10 МГц;
- источник вторичного питания.

ПТН преобразует импульсы тока коллектора ДИЭ в импульсы напряжения. Коэффициент передачи ПТН изменяется в зависимости от режима работы. При измерении импульсов тока инжектируемых ионов коэффициент передачи ПТН равен  $-2 \cdot 10^4$  В/А. При регистрации импульсов электронов коэффициент передачи ПТН равен  $-5 \cdot 10^2$  В/А.

Следует отметить, что ПТН выполнен на базе быстродействующего операционного усилителя (ОУ) типа AD811 (Analog Devices) с обратной связью по току. Этот усилитель имеет низкое входное сопротивление (десятки Ом), шунтирующее емкость входной цепи ПТН, что существенно уменьшает отрицательное влияние этой емкости на частотные и шумовые свойства ПТН. Это позволяет соединять коллектор ДИЭ с блоком электроники с помощью кабеля длиной до 10 м без существенного ухудшения качества сигнала в сравнении с непосредственным соединением коллектора ДИЭ с входом усилителя. В результате становится возможным размещение блока электроники внутри гермоотсека МКС. При этом на поверхности МКС размещается только ДИЭ, не содержащий электроники.

ОУ ПТН имеет плавающее двухполярное питание, на общий провод которого (он же общий провод ПТН) подается напряжение  $U_k$  относительно общего провода (корпуса) блока электроники, электрически соединенного с корпусом ДИЭ и корпусом МКС. Это позволяет задавать необходимое напряжение на коллекторе ДИЭ в зависимости от режима работы прибора путем переключения  $U_k$ .

АЦП осуществляет цифровую обработку импульса напряжения ПТН с частотой преобразования 10 МГц, задаваемой тактовым генератором ТГ. В качестве АЦП используется быстродействующий 12-разрядный АЦП AD9220 (Analog Devices).

Процессор производит обработку выходного сигнала АЦП, обеспечивая для каждого периода импульса инжекции:

- измерение амплитуды (максимума) импульса тока коллектора;
- фиксацию амплитуды импульса тока коллектора, измеренную в предыдущем периоде;
- измерение интервала времени между импульсом инжекции и максимумом (пиком) импульса тока коллектора (время пролета ионов и электронов);
- измерение интервалов времени между импульсом инжекции и моментами, когда фронты импульса тока коллектора пересекают уровень 0,5 амплитуды в предыдущем периоде.

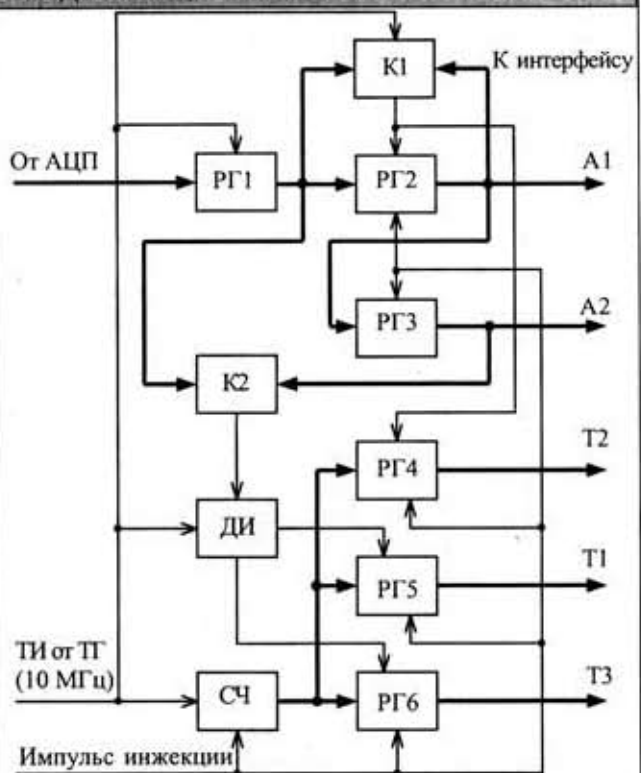


Рис. 3. Структурная схема процессора прибора «Регион»

Запуск процесса обработки происходит при поступлении импульса инжекции и тактируется от ТГ.

Структурная схема процессора приведена на рис. 3. В состав процессора входят три 12-разрядных регистра РГ1—РГ3, 16-разрядный счетчик СЧ, два компаратора К1 и К2, детектор изменений ДИ, три 16-разрядных регистра РГ4—РГ6.

Счетчик СЧ осуществляет подсчет импульсов ТГ внутри периода инжекции. Этот счетчик обнуляется в момент прихода импульса инжекции. Таким образом, СЧ является источником временных интервалов.

РГ1 фиксирует выходной код АЦП по заднему фронту импульсов ТГ.

РГ2 и К1 образуют детектор пика (максимума) импульса тока коллектора ДИЭ. РГ2 осуществляет фиксацию максимума выходного кода РГ1. При поступлении импульса инжекции РГ2 обнуляется. К1 сравнивает коды РГ1 и РГ2. Если код РГ1 больше кода РГ2, то К1 вырабатывает импульс записи в РГ2 кода из РГ1. В результате после пика тока коллектора в РГ2 фиксируется код А1 амплитуды регистрируемого импульса в текущем периоде инжекции.

При поступлении очередного импульса инжекции код с РГ2 переписывается в РГ3 и хранится в нем в течение следующего периода, как код А2 амплитуды — в предыдущем периоде.

В момент, когда К1 вырабатывает импульс фиксации максимума в РГ2, происходит запись кода СЧ в РГ4. В результате после пика тока коллектора в РГ4 фиксируется код Т2 времени максимума регистрируемого импульса в текущем периоде инжекции. Это является результатом измерения времени пролета частиц.

Компаратор К2 сравнивает текущий код РГ1 с кодом старших 11 разрядов на выходе РГ3 (порог 0,5 амплитуды импульса в предыдущем периоде). Когда

код РГ1 превышает вышеуказанный порог, К1 формирует логический импульс, по фронту и спаду которого детектор ДИ вырабатывает импульсы записи кода счетчика в РГ5 (фронт) и РГ6 (спад). В результате в РГ5 и РГ6 фиксируются коды Т1 и Т3, соответствующие временным интервалам, когда фронт и спад импульса регистрируемых частиц пересекают уровень 0,5 амплитуды импульса тока коллектора ДИЭ в предыдущем периоде инжекции.

При поступлении очередного импульса инжекции информация с регистров РГ2—РГ6 переписывается в интерфейс, а затем указанные регистры обнуляются (кроме РГ3).

Интерфейс реализует последовательную асинхронную выдачу информации прибора «Регион» на телеметрическую систему согласно стандарту RS-232. Он преобразует параллельные коды А1, А2, Т1, Т2, Т3, выдаваемые процессором в конце каждого периода инжекции, в телеметрический кадр из последовательности одиночных посылок. Каждая такая посылка состоит из «старт-бита», 5—8 бит данных, бита контроля и 1—2 «стоп-битов». Скорость передачи, количество посылок в кадре, число бит данных в посылке, наличие или отсутствие бита контроля и число «стоп-битов» определяются согласованным протоколом обмена.

Если каждая посылка передает 4 бита (тетраду) исходных данных, то телеметрический кадр может состоять из 19 посылок, согласно табл. 2.

Таблица 2

Структура телеметрического кадра прибора «Регион»

Номер посылки	Наименование данных
1	Маркер начала кадра и режим работы
2—4	Код амплитуды А1
5—7	Код амплитуды А2
8—11	Код временного интервала Т1
12—15	Код временного интервала Т2
16—19	Код временного интервала Т3

Интерфейс обеспечивает согласование скорости измерений и скорости выдачи данных на телеметрию. Если скорости передачи данных недостаточно для передачи информации об измерениях в каждом периоде инжекции, то происходит пропуск данных отдельных периодов.

Работа интерфейса и процессора синхронизируется импульсом инжекции и тактовыми импульсами (ТИ). Скорость обмена с телеметрией определяется отдельным внутренним генератором.

Физически процессор и интерфейс реализуются на базе программируемой логической матрицы (ПЛМ) фирмы ALTERA, что существенно упрощает конструкцию и отладку прибора.

Источник вторичного питания (ИВП) преобразует напряжение бортовой сети в ряд напряжений питания устройств блока электроники и электродов ДИЭ. ИВП представляет собой изолирующий конвертор напряжения, обеспечивающий гальваническую развязку бортовой сети от корпуса блока электроники.

Управление прибором «Регион» осуществляется с помощью релейных команд, подаваемых на ИВП на включение питания, выключение питания, выбор режима регистрации ионов, выбор режима регистрации электронов. В зависимости от выбранного с помощью

последних двух команд режима работы осуществляется переключение напряжений на электродах ДИЭ и вырабатывается сигнал «Режим», управляющий переключением коэффициента передачи ПТН.

Основные параметры прибора «Регион» (значения габаритных размеров и массы указаны без учета кабелей и элементов крепления)

Эффективная площадь коллектора детектора, см <sup>2</sup>	11
Ширина диаграммы направленности детектора, °	±70
Амплитуда регистрируемых импульсов тока ионов, А	2·10 <sup>-7</sup> ...10 <sup>-4</sup>
Амплитуда регистрируемых импульсов тока электронов, А	10 <sup>-5</sup> ...10 <sup>-2</sup>
Энергия отсечки фоновых ионов и электронов, эВ	180
Диапазон измерения временных интервалов (времени пика импульсов, времени начала и конца импульсов по уровню 0,5 амплитуды), мс	0...6,55
Дискретность измерения временных интервалов, мкс	0,1
Допустимый период повторения инжектируемых импульсов, мс	8—1000
Допустимая амплитуда логического импульса инжекции, В	2,4...5
Информативность измерений, бит/период	72
Максимальная скорость выдачи информации через интерфейс RS-232, Кбит/с	19,2
Количество «релейных» команд управления	4
Напряжение питания, В	23...30
Потребляемая мощность, Вт	≤5
Габаритные размеры блока электроники, мм, не более	168×104×98
Масса блока электроники, кг	≤0,85
Габаритные размеры ДИЭ, мм	∅85×60
Масса ДИЭ, кг	≤0,15

В заключение отметим технические решения, обеспечивающие высокие эксплуатационные характеристики прибора «Регион»

Применение в ПТН усилителя с токовой обратной связью дает возможность существенно (до 10 м) удалить ДИЭ от блока электроники. Это позволяет разместить блок электроники в гермоотсеке модуля МКС и тем самым обеспечить более благоприятные условия эксплуатации для электроники прибора.

Применение высокоскоростного АЦП и ПЛМ позволяет реализовать полностью цифровую обработку сигнала ДИЭ. В результате повышается стабильность параметров прибора, уменьшается объем аппаратуры, упрощается настройка и отработка прибора.

Применение последовательного интерфейса выдачи данных в стандарте RS-232 дает возможность подключить прибор вместо телеметрической системы к СОМ-порту персональных компьютеров, что весьма удобно в процессе отработки прибора.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Гримальский В. В., Ивченко В. Н., Лизунов Г. В. Спутниковые наблюдения ионосферных предвестников землетрясений // *Космічна наука і технологія*.— 2000.— Т. 6, № 2/3.— С. 21—30.
2. Барабанов Н. А., Венедиктов Ю. И., Гдалевич Г. Л. и др. Блок детектора импульсов для космического эксперимента «Кольцо» на борту МКС / В сб. трудов Первой украинской конференции по перспективному космическим исследованиям.— Киев: Изд. дом «АДЕФ-Украина», 2001.— С. 36—39.
3. Безруких В. В., Барабанов Н. А., Венедиктов Ю. И. и др. Исследование малозонергичной плазмы в магнитосфере Земли на Хвостовом и Авроральном зондах. Аппаратура и предварительные результаты // *Космические исследования*.— 1998.— Т. 36, вып. 1.— С. 33—41.

И. С. КОНДРАШЕНКОВ

Россия, г. С.-Петербург, НПО «Прибор»  
E-mail: ak2000@mail.ruДата поступления в редакцию  
09.11.2005 г.Оппонент д. т. н. Л. С. ЛУТЧЕНКОВ  
(НПП "ЭлектроРадиоАвтоматика",  
г. С.-Петербург)

## АЛГОРИТМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЭС С МНОГОУРОВНЕВЫМ ЭЛЕКТРОМОНТАЖОМ С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

*Предлагается алгоритм расчета и анализа параметров и показателей качества электромагнитной совместимости РЭС как сложных систем, обладающих многоуровневым электромонтажом.*

На начальном этапе развития радиоэлектронных средств (РЭС), который характеризуется относительно низким быстродействием изделий электронной техники (ИЭТ) и невысокой сложностью электронных модулей (ЭМ), проблема электромагнитного проектирования РЭС не стояла так остро, а их конструкторское проектирование сводилось в основном к обеспечению технологичности, механической прочности и нормального теплового режима.

Естественно, что с повышением быстродействия и плотности компоновки ИЭТ одной из важнейших становится задача комплексного и сбалансированного подхода к обеспечению требований электромагнитной совместимости ЭМ различного функционального и эксплуатационного назначения при создании РЭС как сложных иерархических систем. Особенно сложным является решение этой общесистемной задачи при проектировании перспективных многоуровневых стоечных РЭС. Это объясняется тем, что именно стоечные РЭС отличаются повышенной конструктивной сложностью, большим числом и разнообразием размещаемых в них ЭМ, построенных на ИЭТ с применением новых физических принципов функционирования. Кроме того, в составе стоечных базовых несущих конструкций (БНК) присутствуют конструктивные модули всех уровней структурной иерархии [1, 2], на основе которых строятся конструктивные системы для размещения всего комплекса ЭМ проектируемых РЭС (шкафы, пульты, настольные приборы и другие).

При этом электромонтаж, особенно многоуровневый, играет важнейшую роль в обеспечении требований электромагнитной совместимости и, следовательно, надежного функционирования РЭС, т. к. связывает ЭМ всех уровней структурной иерархии создаваемых РЭС.

Разработка электромонтажа является общесистемной задачей, обладающей высокой сложностью и размерностью в связи с использованием при создании РЭС множества видов и методов электромонтажа, а также вариантов его конструктивно-технологическо-

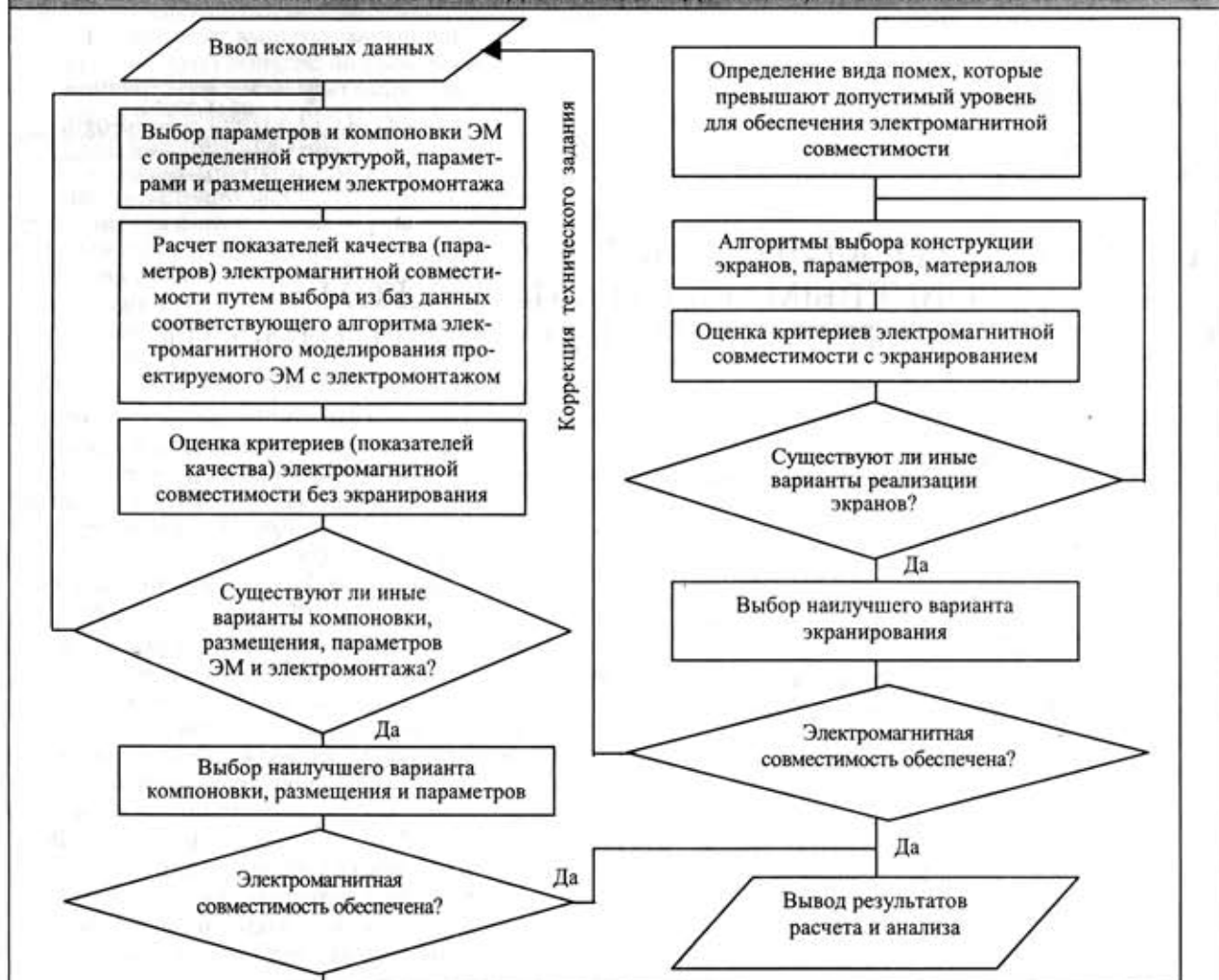
го исполнения [3—5]. Поэтому возникает необходимость в поиске или разработке пригодных для автоматизации математических моделей и алгоритмов на их основе, которые могли бы обеспечить требования электромагнитной совместимости для создания новых поколений ЭМ и РЭС в целом.

На основе проведенных исследований и разработок (см., например, [3—10]) предлагается общесистемный алгоритм расчета и анализа показателей качества электромонтажа ЭМ РЭС с учетом обеспечения требований электромагнитной совместимости. На рисунке отражены основные проектные операции и процедуры, решающие задачи обеспечения электромагнитной совместимости при структурном и параметрическом синтезе вариантов электромонтажа для ЭМ многоуровневых РЭС, создаваемых на основе БНК.

Алгоритм построен с учетом приоритетного синтеза более экономичных технических решений. Так, при синтезе конструктивных модулей с размещаемым в них электромонтажом следует, в зависимости от характера компоновочных в них ЭМ (например, приемников, передатчиков, усилителей, источников питания, диапазонов их рабочих частот, амплитуд и длительности импульсов), обеспечивать электромагнитную совместимость в первую очередь компоновочными мерами. То есть следует обеспечивать электромагнитную совместимость максимальным удалением друг от друга источника и приемника помех или выбором такой их взаимной ориентации, когда коэффициент взаимной паразитной емкостной или индуктивной связи минимален [3, 5, 8].

И только если этих мер окажется недостаточно или они будут невозможны для реализации с позиций иных критериев (показателей качества) электромагнитной совместимости ЭМ с электромонтажом, следует применять экраны. Причем вначале следует пытаться использовать существующие несущие элементы конструктивных модулей БНК в качестве экранов (путем модификации их формы, нанесения соответствующих покрытий), и только при недостаточной эффективности этой меры приступать к применению экранов как самостоятельных конструктивных элементов [5, 10].

Такая последовательность расчета параметров электромагнитной совместимости и экранов для электромонтажа ЭМ и РЭС в целом обусловлена актуальным требованием снижения затрат на производство электромонтажа, РЭС и БНК для их размещения.



Общесистемный алгоритм электромагнитного проектирования РЭС как сложных систем с многоуровневым электрооборудованием

Поэтому вначале должны быть проанализированы средства, требующие для своего воплощения минимальных затрат, и только в случае их недостаточной эффективности можно переходить к более дорогостоящим способам обеспечения электромагнитной совместимости.

Необходимо отметить, что автоматизация процессов структурного и параметрического синтеза электрооборудования для перспективных РЭС различного назначения с учетом обеспечения требований электромагнитной совместимости осуществляется с применением диалогового и пакетного режимов работы. При этом используются существующие и специально разработанные математические модели, алгоритмы и программные средства (см., например, [3—10]), обеспечивающие формирование необходимых баз данных по структурам вариантов электрооборудования и функциональным зависимостям их параметров для вариантов подсистем обеспечения электромагнитной совместимости РЭС.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. ГОСТ Р 50756.0—2000. Конструкции несущие базовые радиоэлектронных средств. Типы. Основные размеры.

2. ГОСТ Р 51623—2000. Конструкции несущие базовые радиоэлектронных средств. Система построения и координационные размеры.

3. Лутченков Л. С. Методы и алгоритмы структурно-параметрического синтеза электрооборудования радиоэлектронных систем.— СПб: Политехника, 1999.

4. Лутченков Л. С. Модели и алгоритмы системного синтеза несущих конструкций радиоэлектронных средств АСУ.— СПб: Политехника, 2004.

5. Шерин К. Ю. Методы расчета и оптимизации параметров электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств.— СПб: Политехника, 2005.

6. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем / В. И. Владимиров, А. Л. Докторов, Ф. В. Елизаров и др.— М.: Радио и связь, 1985.

7. Петровский В. И., Седельников Ю. Е. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств.— М.: Радио и связь, 1986.

8. Лутченков Л. С. Математическое моделирование электромагнитной совместимости радиоэлектронных устройств.— СПб: СПб ГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 1995.

9. Шерин К. Ю. Синтез типоразмерных рядов базовых несущих конструкций радиоэлектронных средств АСУ.— СПб: СПб ГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2000.

10. Романова Ю. С. Математическое обеспечение многокритериального синтеза базовых несущих конструкций радиоэлектронных средств АСУ.— СПб: Политехника, 2004.

А. Ю. ЛИПИНСКИЙ, А. Н. РУДЯКОВА, д. т. н. В. В. ДАНИЛОВ

Украина, Донецкий национальный университет  
E-mail: krf@dongu.donetsk.uaДата поступления в редакцию  
11.11 2005 г.  
Оппонент д. т. н. Ф. В. НЕДОПЕКИН  
(ДонНУ, г. Донецк)ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССОРА  
ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

*Выполнено моделирование операций умножения и задержки в акустооптической среде. Предложена структурная схема цифрового акустооптического сигнального процессора.*

Акустооптические аналоговые процессоры отличаются высокой скоростью обработки данных, большим объемом параллельно обрабатываемой информации, простота выполнения таких математических операций как преобразование Фурье, свертка, корреляция [1—3]. Тем не менее аналоговые методы обработки информации не могут обеспечить необходимую при решении многих задач точность вычислений. В связи с этим актуально использование цифровых оптических вычислительных методов, которые могут составить конкуренцию аналоговому оптическому и цифровому электронному методам.

В ряде источников предлагается, используя методы аналоговой обработки информации, применять цифровое представление данных в целях создания высокоскоростных прецизионных процессоров для выполнения операций линейной алгебры [4, 5]. Однако успешное проектирование цифровых акустооптических сигнальных процессоров включает в себя этап достаточно сложного моделирования физических процессов взаимодействия оптических и акустических волн в акустооптической среде, требующего привлечения численных методов расчета.

Целью работы является моделирование операций умножения и задержки в акустооптической среде, определение линейного участка зависимости интенсивности первого дифракционного максимума от амплитуды изменения показателя преломления среды, вызванного акустической волной.

**Моделирование операций умножения и задержки при акустооптическом взаимодействии**

Дифракцию света на звуке феноменологически можно описать, если в уравнениях состояния среды учесть нелинейные перекрестные члены, отвечающие электромагнитному полю и упругим деформациям. Электромагнитная и акустическая волны должны при этом удовлетворять соответственно уравнениям Максвелла и механическому уравнению движения. Единственный перекрестный член, отвечающий за взаимодействие, появляется в уравнении состояния для индукции, которое будет выглядеть следующим образом [6, с. 340]:

$$D_i = (\varepsilon_{ij} + f_{ijk}u_k)E_j + e_{qi}u_q, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{ij}$  — тензор диэлектрической проницаемости;  
 $f_{ijk}$  — тензор электрострикции;  
 $e_{qi}$  — пьезомодули.

Член  $f_{ijk}u_k$  можно рассматривать как изменение диэлектрической проницаемости, вызванное звуковой волной.

Ограничимся рассмотрением изотропного твердого тела. При этом пьезоэффект отсутствует, и из уравнений Максвелла и соотношения (1) можно получить волновое уравнение для электрического поля:

$$\Delta E = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 (\varepsilon E)}{\partial t^2}. \quad (2)$$

Дальнейшее упрощение состоит в том, что электромагнитная волна считается слабой, а акустическая — достаточно интенсивной. При этом изменение интенсивности звука, обусловленное взаимодействием со светом, за счет механизма электрострикции пренебрежимо мало, и можно пользоваться приближением заданного звукового поля [6, с. 341; 7].

В предположении что интенсивность звука такова, что нелинейные эффекты при распространении звуковой волны практически не проявляются, диэлектрическую проницаемость среды можно представить в виде [7; 8, с. 34]:

$$\varepsilon = n^2 + 2n\Delta n \sin(Kz - \Omega t + \Phi), \quad (3)$$

где  $n$  — показатель преломления невозмущенной среды;  
 $\Delta n$  — амплитуда изменения показателя преломления;  
 $K, \Omega$  и  $\Phi$  — соответственно волновое число, частота и начальная фаза акустической волны.

Предположим, что на плоскость  $x=0$  под углом  $\theta$  к оси  $x$  падает плоская электромагнитная волна (рис. 1)

$$E = E_0 \exp[j(k_0 x \cos \theta + k_0 z \sin \theta - \omega_0 t)], \quad (4)$$

где  $E_0, \omega_0, k_0$  — соответственно ее амплитуда, частота и волновое число.



Рис. 1. Дифракция света на акустической волне

Решение уравнения (2) в этом случае можно представить в виде суммы дифракционных максимумов — собственных волн среды, имеющих частоты  $\omega_p = \omega_0 + p\Omega$ , где  $p$  — целое число, определяющее номер дифракционного максимума [8, с. 34]. Предположим, что поля не зависят от координаты  $y$ . При этом проекции волновых векторов на оси  $y$ ,  $z$  и  $x$  можно записать как

$$\begin{aligned} k_{py} = k_{0y} = 0; \quad k_{pz} = k_0 \sin\theta + pK; \\ k_{px} = \pm \sqrt{k_p^2 - k_{pz}^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$k_p = \omega_p n / c.$$

Как видно из (5), компонента поля с частотой  $\omega_p$  состоит из двух волн с проекциями волнового вектора на ось  $x$ , равными  $\pm k_{px}$  [8]. Одна из этих волн соответствует дифракции света вперед (проходящая волна), а другая — назад, против распространения исходной волны (отраженная волна).

Решение уравнения (2) можно представить в виде [8, с. 35]

$$E = E_0 \sum_p \sum_{\alpha=\pm 1} \left\{ C_{p,\alpha}(x) \exp[j(\alpha k_{px}x + k_{pz}z - \omega_p t)] \right\}. \quad (6)$$

Поскольку в (6) неизвестная функция, описывающая амплитуду поля частоты  $\omega_p$ , заменена двумя функциями  $C_{p,1}(x)$  и  $C_{p,-1}(x)$ , то на эти функции должно быть наложено дополнительное условие. Можно выбрать его таким, чтобы производная  $\partial E / \partial x$  была равна

$$\frac{\partial E}{\partial x} = jE_0 \sum_p \sum_{\alpha=\pm 1} \alpha k_{px} C_{p,\alpha}(x) \exp(j\varphi_{p,\alpha}), \quad (7)$$

где  $\varphi_{p,\alpha} = \alpha k_{px}x + k_{pz}z - \omega_p t$ .

Равенство (7) с учетом (6) означает, что

$$\sum_{\alpha=\pm 1} \frac{dC_{p,\alpha}}{dx} \exp(j\alpha k_{px}x) = 0. \quad (8)$$

Подставляя предполагаемое решение (6) в уравнение (2) с учетом (7) и (3), можно получить соотношение [8, с. 36]

$$\begin{aligned} \sum_p \sum_{\alpha=\pm 1} \alpha k_{px} \frac{dC_{p,\alpha}}{dx} \exp(j\varphi_{p,\alpha}) = \\ = \sum_p \sum_{\alpha=\pm 1} \left\{ \frac{\omega_{p+1}^2 n^2 \Delta n}{c^2} C_{p,\alpha} \exp[j(\varphi_{p,\alpha} + Kz - \Omega t + \Phi)] - \right. \\ \left. - \frac{\omega_{p-1}^2 n^2 \Delta n}{c^2} C_{p,\alpha} \exp[j(\varphi_{p,\alpha} - Kz + \Omega t - \Phi)] \right\}. \end{aligned}$$

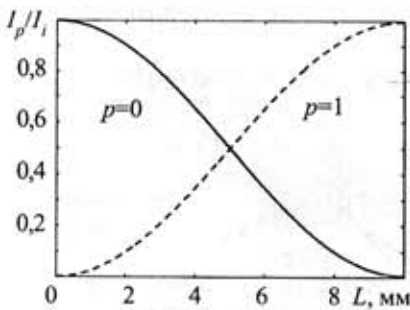


Рис. 2.  $Q=31,56$ ,  $\theta=\theta_B$ . Брегговская дифракция

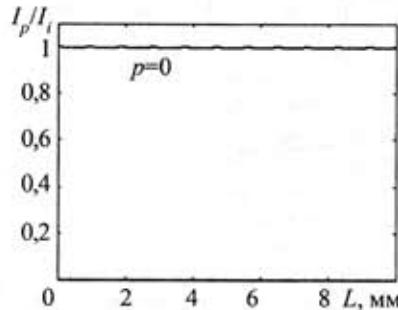


Рис. 3.  $Q=31,56$ ,  $\theta \neq \theta_B$ . Дифракция отсутствует

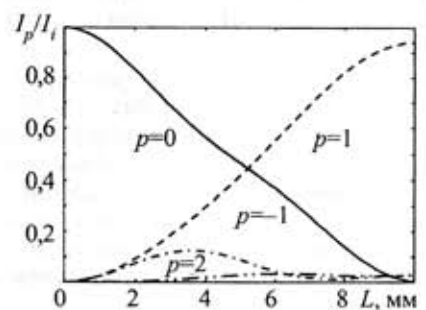


Рис. 4.  $Q=1,26$ ,  $\theta=\theta_B$ . Промежуточный режим дифракции

Из этих соотношений, приравняв коэффициенты при экспоненциальных множителях с одинаковыми частотами  $\omega_p$ , с учетом (8) можно получить следующую систему дифференциальных уравнений первого порядка для определения амплитуд  $C_{p,\alpha}$ :

$$\begin{aligned} \frac{dC_{p,\alpha}}{dx} = \frac{\alpha q_p}{2} \left[ (C_{p-1,\alpha} e^{j\alpha \xi_{p-1} x} + C_{p-1,-\alpha} e^{-j\alpha \xi_{p-1} x}) e^{j\Phi} - \right. \\ \left. - (C_{p+1,\alpha} e^{j\alpha \xi_{p+1} x} + C_{p+1,-\alpha} e^{-j\alpha \xi_{p+1} x}) e^{-j\Phi} \right], \end{aligned} \quad (9)$$

где  $q_p = k_p^2 \Delta n / (k_{px} n)$ ,  $\eta_p = k_{pz} - k_{p+1,z}$ ,  $\xi_p = k_{px} + k_{p+1,x}$ .

Как показано в [8, с. 37], при обычных условиях дифракции можно пренебречь амплитудами всех максимумов, отраженных решеткой, и вместо уравнений (9) рассматривать систему уравнений

$$\frac{dC_p}{dx} = \frac{q_p}{2} \left[ C_{p-1} e^{j(\eta_{p-1} x + \Phi)} - C_{p+1} e^{-j(\eta_{p+1} x + \Phi)} \right]. \quad (10)$$

Выражения для интенсивностей дифракционных максимумов могут быть получены из (6):

$$I_p = |E_p|^2 = E_0^2 \cdot |C_p(x)|^2,$$

где  $E_p = E_0 C_p(x) \exp[j(k_{px}x + k_{pz}z - \omega_p t)]$  — поле дифракционного максимума  $p$ -го порядка. При этом интенсивность падающей волны, как видно из (4), равна  $I_0 = E_0^2$ .

Как известно [6; 7; 8, с. 39—42], брэгговский режим дифракции реализуется для достаточно больших акустической частоты и длины области взаимодействия  $L$  ( $Q = K^2 L / (2\pi k_0) \gg 1$ ) при выполнении условия Брэгга—Вульфа:

$$\sin \theta_B = -K / (2k_0). \quad (11)$$

На рис. 2—4 приведены отношения интенсивностей дифракционных максимумов нулевого, а также первых десяти положительных и первых десяти отрицательных порядков, полученных путем численного решения системы уравнений (10), к интенсивности падающей волны в зависимости от длины области взаимодействия.

Рис. 2 соответствует брэгговской дифракции. На рис. 3 изображен случай с достаточным для дифракции Брэгга значением  $Q=31,56$ , однако условие Брэгга—Вульфа не выполнено, и дифракция отсутствует. На рис. 4 приведен промежуточный режим дифракции, когда условие (11) выполнено, однако  $Q=1,26$  достаточно мало.

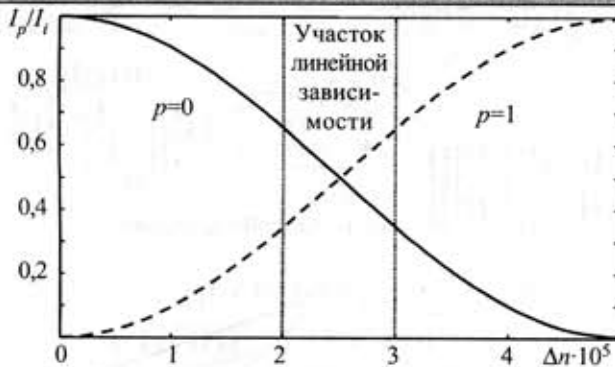


Рис. 5. Отношения интенсивностей нулевого и первого дифракционных порядков к интенсивности падающей волны в зависимости от изменения показателя преломления среды  $\Delta n$ , вызванного акустической волной

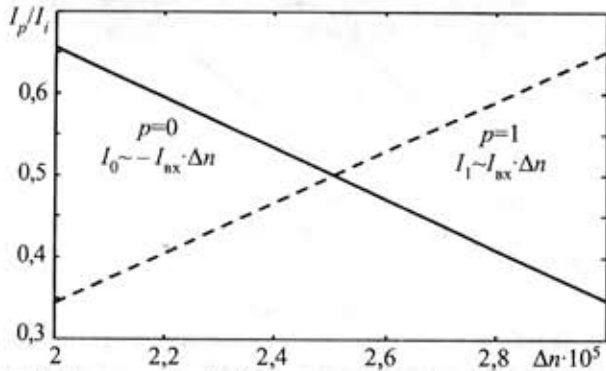


Рис. 6. Участок линейной зависимости нормированных интенсивностей первого и нулевого дифракционных порядков от амплитуды изменения показателя преломления  $\Delta n$

Рассмотрим, как изменяются интенсивности первого и нулевого порядков дифракции при росте амплитуды изменения показателя преломления  $\Delta n$  для заданной длины области взаимодействия  $L=10$  мм. Результаты расчета для случая брэгговской дифракции ( $Q=31,56$ ,  $\theta=\theta_B$ ) приведены на рис. 5.

Как для первого, так и для нулевого порядков можно выделить участок линейной зависимости нормированной интенсивности от амплитуды изменения показателя преломления, приведенный на рис. 6.

Поскольку для диапазона амплитуд  $\Delta n$ , соответствующего участку линейной зависимости (см. рис. 6), с точностью до некоторой постоянной интенсивности можно записать

$$\frac{I_1}{I_{вх}} \sim \Delta n, \quad I_1 \sim I_{вх} \cdot \Delta n; \quad (12)$$

$$\frac{I_0}{I_{вх}} \sim -\Delta n, \quad I_0 \sim -I_{вх} \cdot \Delta n, \quad (13)$$

подобный режим акустооптического взаимодействия может быть использован для выполнения операции умножения. При этом один операнд задается интенсивностью падающей световой волны; другой операнд — амплитудой акустической волны, определяющей амплитуду изменения показателя преломления  $\Delta n$ . Результат операции пропорционален интенсивности первого дифракционного порядка с коэффициентом, зависящим от свойств материала среды. В случае использования нулевого порядка дифракции результат будет отличаться знаком.

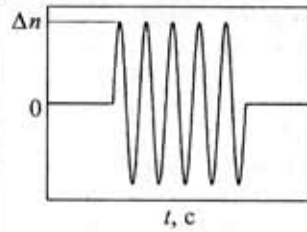


Рис. 7. Кодирование «акустического» множителя радиоимпульсом с пропорциональной амплитудой

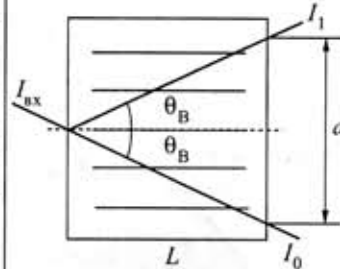


Рис. 8. Заполнение области взаимодействия ультразвуком

Оценку производительности такой системы можно выполнить исходя из того, что при кодировании «акустического» множителя радиоимпульсом с пропорциональной амплитудой (изображенным на рис. 7) интенсивность дифрагировавшего света достигнет стационарного значения спустя промежуток времени, необходимый для заполнения ультразвуком всей области взаимодействия [8, с. 162, 163].

Как видно из рис. 8, высота столба ультразвука, закрывающая всю область взаимодействия, равна

$$d = 2L \operatorname{tg} \theta_B = \frac{2L}{\sqrt{\left(\frac{2k_0}{K}\right)^2 - 1}},$$

причем для малых  $\theta_B$  при  $k_0 \gg K$ ,  $\operatorname{tg} \theta_B = \sin \theta_B = K/(2k_0)$  это выражение можно записать как

$$d = \frac{LK}{k_0}. \quad (14)$$

В результате время заполнения области взаимодействия ультразвуком, используя (14), можно записать как

$$T = \frac{d}{V} = \frac{LK}{Vk_0}, \quad (15)$$

где  $V$  — скорость звука в материале среды. Например, для длины области взаимодействия  $L=10$  мм, скорости звука 6 км/с и частоты акустической волны 500 МГц время заполнения равно 63,1 нс. Удваивая это время для отделения одного кодирующего радиоимпульса от другого, получим для одной ячейки 7,92 миллиона операций в секунду. Увеличить это значение можно уменьшением длины области взаимодействия, выбором материала с большей скоростью ультразвука, а также уменьшением длины волны оптического сигнала.



Рис. 9. Реализация задержки в акустооптической среде

Другой особенностью акустооптической среды является то, что она выступает как последовательность элементов задержки [5]. Это значит, что она содержит не только текущий входной сигнал, но и предыдущие значения (рис. 9).

### Структурная схема процессора

Используем цифровое представление данных, предназначенных для обработки. В этом случае целесообразно применить традиционные алгоритмы электронного цифрового сигнального процессора. Как известно, в основу работы такого процессора положены операции умножения с накоплением (МАС-операции), являющиеся базовыми для выполнения задач цифровой фильтрации, дискретного преобразования Фурье, корреляции, и т. д. [9, с. 189, 249].

Как показано выше, операции умножения и задержки могут быть реализованы в акустооптической среде. Суммирование может быть реализовано при помощи фотодетекторов средствами электроники системы.

Обрабатываемый сигнал  $s(t)$ , с целью дискретизации его во времени, умножается на периодическую последовательность радиоимпульсов (рис. 10).

При подаче последовательности  $v(t)$  на акустический излучатель, который преобразует электрический сигнал  $v(t)$  в механические колебания, в акустооптической среде будут возбуждаться акустические волны.

Если  $V$  — заданная скорость акустической волны в акустооптической среде, сигнал, появившийся в плоскости  $x_1$ , — это тот же сигнал, который был в точке  $x_1 - Vt_1$  на  $t_1$  секунд раньше. Следовательно, если разделить акустооптическую среду на ячейки длиной  $2VT$  каждая, где  $T$  определяется выражением (15), можно получить конфигурацию, изображенную на рис. 11.

Похожий метод использовался в [5] — с той разницей, что акустический сигнал несущей частоты, удовлетворяющей условию брэгговской дифракции, модулировался обрабатываемым сигналом амплитудно. Это приводило к появлению дополнительных слагаемых в выражении для интенсивности дифракционного максимума первого порядка, что усложняло реализацию операции умножения.

Расположим  $k+1$  полупроводниковых лазеров с шагом  $2VT$  так, чтобы каждый из них был направлен под углом Брэгга  $\theta_B$  (см. рис. 11).

Рассматривая акустооптическое взаимодействие в  $i$ -й ячейке, в соответствии с (12), (13) для первых дифракционных максимумов получим произведение  $I_{вх,i} v[n-i]$ , где  $v[n-i]$  — акустический сигнал в  $i$ -й ячейке.  $v[n-i]$  — это  $v(t)$  при  $(n-i)2T < t < (n-i+1)2T$ .

Для дифракционных максимумов нулевого порядка результат будет отличаться знаком.



Рис. 10. Обработка входного сигнала

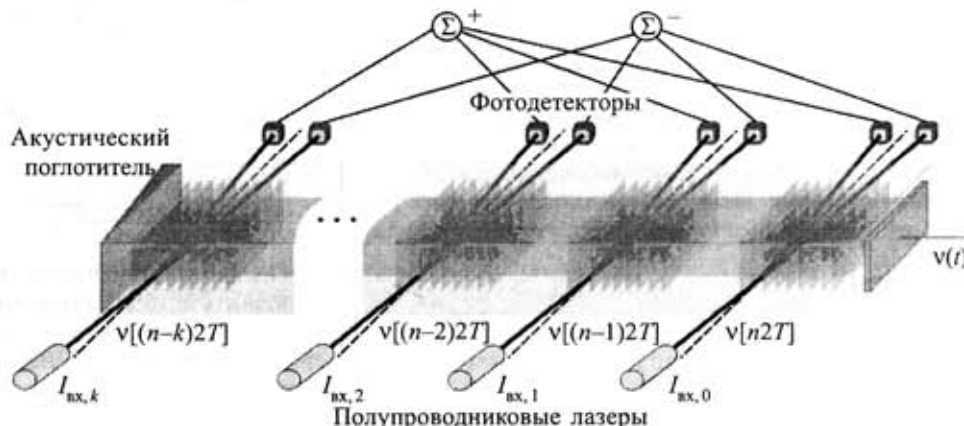


Рис. 11. Акустооптическая среда, возбуждаемая полупроводниковыми лазерами с интенсивностями  $I_{вх,0}, I_{вх,1}, I_{вх,2}, \dots, I_{вх,k}$

### Выводы

В работе выполнено моделирование операций умножения и задержки в акустооптической среде. Предложена структурная схема цифрового акустооптического сигнального процессора. Поскольку акустооптическая среда содержит все отсчеты, участвующие в МАС-операциях, можно рассматривать ее как аналог сверхоперативного запоминающего устройства со значительно большим быстродействием, чем существующие электронные.

С ростом частоты радиосигнала использование электронных цифровых сигнальных процессоров затрудняется в связи с необходимостью их схемотехнического решения как СВЧ-устройств. В случае акустооптического процессора существенно упрощается схема, удешевляется стоимость устройства.

Перспективным является исполнение цифрового сигнального акустооптического процессора по интегральной технологии.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Наумов К. П., Ушаков В. Н. Акустооптические сигнальные процессоры. — М.: Сайнс-Пресс, 2002.
2. Rhodes W. T. Acousto-optic signal processing: convolution and correlation // Proc. IEEE.— 1981.— Vol. 69, N 1.— P. 65—79.
3. Функциональные устройства обработки сигналов / С. А. Баруздин, Ю. В. Егоров, Б. А. Калинин и др. — М.: Радио и связь, 1997.
4. Раковский В. Ю., Щербakov А. С. Акустооптический цифровой процессор-умножитель // Журнал технической физики.— 1989.— Т. 59, вып. 9.— С. 178—180.
5. Salamat F., Marks R. J. Acoustooptic digital filter // Applied Optics.— 1985.— Vol. 24, N 6.— P. 829—835.
6. Красильников В. А., Крылов В. В. Введение в физическую акустику.— М.: Наука, 1984.
7. Гуляев Ю. В., Проклов В. В., Шкердин Г. Н. Дифракция света на звуке в твердых телах // Успехи физических наук.— 1978.— Т. 124, вып. 1.— С. 61—111.
8. Балакшиев В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. Физические основы акустооптики.— М.: Радио и связь, 1985.
9. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов.— СПб: Питер, 2002.

К. т. н. Г. М. ВИНОГРАДОВ, к. т. н. В. В. СМАГЛЮК,  
К. В. КОЛЕСНИК

Украина, г. Киев, НПФ «Превин ЛТД»; г. Харьков, НИПИ «Союз»  
E-mail: vinograd@i.com.ua

Дата поступления в редакцию  
27.05 2005 г.

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

## СИСТЕМЫ ОХРАННОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОТОКА СВЧ-СИГНАЛА И ФАЗООБРАЗУЮЩИХ СРЕДСТВ

*Применение фазообразующих средств создает реальные предпосылки для дальнейшего развития и более успешного применения радиолучевых охранных систем.*

В связи с возросшей в последнее время ролью систем охранной сигнализации (не только в промышленности, но и в малом бизнесе, частной жизни) все больший интерес проявляют к средствам контроля доступа и датчикам движения, использующим разнообразные физические принципы регистрации присутствия или движения объектов.

В настоящее время известны системы охранной сигнализации, использующие охранные датчики на основе инфракрасных, индукционных, радиоволновых, емкостных, электромагнитных и др. средств регистрации. Цель статьи — рассмотрение радиолучевых охранных систем (РОС), их возможностей и перспектив развития.

Работа РОС основана на свойстве поглощения и отражения объектами, людьми электромагнитного потока СВЧ-сигнала между разнесенными на охраняемом объекте передающей и приемной антеннами. Антенны РОС ориентированы друг на друга, между ними формируется электромагнитное (ЭМ) поле — поле регистрации проникновения нарушителя. Передающая антенна излучает СВЧ-сигнал в направлении приемной, а в приемном блоке регистрируется его уровень. При появлении нарушителя образуется тень ЭМ-поля. Реакция на эту тень, «теневого» сигнал, и регистрируется.

Согласно известному положению физики — принципу Ферма действительный путь распространения света (в данном случае электромагнитной волны) между двумя точками есть такой путь, для прохождения которого свету требуется наименьшее время по сравнению с другими мыслимыми путями между этими точками. А этот путь есть прямая между данными точками.

Принцип Ферма в полной мере объясняет работу РОС, в том числе и с воздействием СВЧ-сигналов, вызванных боковыми лепестками диаграммы направленности ее антенн. Побочные, переотраженные сигналы, вызванные дифракцией и отражением от окружающих предметов, находящихся за пределами прямой линии, также воздействуют на «теневого» сиг-

нал. Эти влияния обычно негативны, но и их можно использовать для решения дополнительных задач РОС, например для индикации присутствия фоновых предметов или (при необходимости) для получения дополнительной информации об окружающей среде. А основной, «теневого» сигнал формируется главным лепестком диаграммы направленности приемной и передающей антенн, причем осевой их частью.

Поток электромагнитной волны, попадающий непосредственно от передающей антенны в приемную, имеет форму вытянутого тела. Оно образовано совокупностью отрезков прямых линий, проходящих между всеми точками раскрытов приемной и передающей антенн. Если антенны круглые, параболические зеркальные, то форма такого тела представляет собой вытянутый цилиндр или вытянутый прямоугольный параллелепипед. Если же это плоские прямоугольные решетки одинаковой формы и ориентации, то поток ЭМ-волны имеет форму вытянутого прямоугольного параллелепипеда. Конечно, все это имеет место в идеальном случае или если влиянием окружающих предметов можно пренебречь. Реальность же вносит свои коррективы. В основном это интерференция всякого рода отраженных и дифрагировавших сигналов от прилегающих предметов с основным сигналом, попадающим непосредственно от излучающей антенны в приемную.

Для минимизации интерференционных составляющих сигнала целесообразно использовать фазированные антенные решетки (ФАР), поскольку возможности ФАР адаптировать ее характеристики к условиям окружающей среды, к текущим условиям эксплуатации РОС существенно выше, чем у других антенн. Нормальная работа РОС в большой степени зависит от гармоничного функционирования ее антенн и в целом РОС в реальной окружающей среде. Для достижения этой гармонии необходимо иметь возможность достаточно легко изменять характеристики диаграммы направленности приемной и передающей антенн, иметь простую методику расчета и доступную технологию их изготовления с возможностью простой доработки базовой ФАР под текущие условия на данном объекте. Такой антенной, по нашему мнению, является микрополосковая (МП) ФАР. При изготовлении МП ФАР применяется технология производства печатных плат.

Для количественной оценки работы РОС в реальных условиях, создания возможности управления их



рабочими параметрами, характеристиками, введено новое понятие — *фазообразующее средство* [1, 2]. Имеется в виду, что в пространство между приемной и передающей антеннами РОС специально внесены пассивные и дополнительные активные антенны, радиозеркала и др. Все это позволяет сформировать необходимое электромагнитное поле в заданной области пространства, которое своей формой и местоположением, энергетическим уровнем, мощностью и т. д. обеспечит выполнение конкретных задач, поставленных перед РОС (естественно, с известной степенью приближения). То есть фазообразующее средство это не совсем конкретное устройство, а сформированная среда, в которой ее дифракционные и отражательные характеристики скорректированы и доведены до таких возможностей, чтобы в заданном месте пространства электромагнитное поле обеспечивало бы выполнение поставленной перед РОС задачи.

Например, фазообразующие средства позволили минимизировать «бочкообразность» в РОС, т. е. уменьшили толщину зоны чувствительности между ее приемной и передающей антеннами, а также получить другие полезные свойства, такие как формирование регистрирующего поля чувствительности в виде электромагнитного забора с прямолинейной или плавно изогнутой формой.

ЭМ-заборы уже созданы (см. рисунок), и одна из последних моделей (ЕМЦ-200) сертифицирована. Несколько вариантов ЭМ-заборов были внедрены в Южной Корее, на Украине. Последние модели ЭМ-

заборов имеют высоту чувствительного ЭМ-поля до двух метров по всей его длине и толщину в несколько десятков сантиметров (в модели для Южной Кореи была достигнута толщина 30 см при длине чувствительного поля 200 м, в то время как известные зарубежные компании изготавливают РОС с «бочкообразностью» в несколько метров, т. е. на порядок хуже, чем в ЭМ-заборе). Во время демонстрационных испытаний перед заключением лицензионного договора с южно-корейской компанией Nara Security была показана возможность создания и плавно изогнутого по длине ЭМ-забора. ЭМ-забор был представлен и на международной специализированной выставке «Безопасность и защита» в 2003 г. в г. Абу-Даби (ОАЭ).

Применение фазоформирующих средств позволяет решать задачи, связанные с использованием ЭМ-заборов на пересеченной местности, что считалось принципиально невозможным для средств РОС.

Таким образом, разработка и применение фазообразующих средств создают реальные предпосылки для дальнейшего развития и более успешного применения радиолучевых охранных систем.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Пат. 74556 Украины. Система формирования регистрирующего электромагнитного поля заданной конфигурации (варианты) / НПФ «Превин ЛТД». — 2006. — Бюл. № 1.
2. Пат. 55520 Украины. Радиолучевая охранная система / НПФ «Превин ЛТД». — 2003. — Бюл. № 4.

К. х. н. Л. Т. СТРУТИНСКАЯ, к. х. н. В. Я. МИХАЙЛОВСКИЙ,  
Е. В. ЧАЙКОВСКАЯ

Украина, г. Черновцы, Институт термоэлектричества  
E-mail: strutinska@mail.ru

Дата поступления в редакцию  
19.12 2005 г.

Оппонент д. ф.-м. н. В. П. МИХАЛЬЧЕНКО  
(ЧФ Харьк. политехн. ун-та, г. Черновцы)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА С НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛА

*Предложена модель термоэлектрического генератора, позволяющая оптимизировать его параметры путем согласования системы теплообмена, конструктивных параметров термогенератора и свойств термоэлектрических батарей.*

В настоящее время актуальным для Украины становится развитие различных видов нетрадиционной возобновляемой энергетики. Это направление тесно связано с созданием полупроводниковых термоэлектрических генераторов с низкопотенциальными источниками тепла. Такие источники тепла (в частности, геотермальное тепло, тепло океана, промышленное отработанное тепло) имеются в больших количествах и могут быть использованы для генерирования электрической энергии с помощью термоэлектрических устройств [1, 2].

Конструкция полупроводникового термоэлектрического генератора может быть оптимизирована в соответствии с видом источника тепла. Если используется дорогое тепло, главное внимание отводится КПД преобразования. В случае дешевого (отработанного) тепла главной задачей является снижение стоимости конструкции [3]. Для случаев, когда главную роль играют объемные характеристики, приоритетным становится уменьшение объема системы. Однако комплексному исследованию термоэлектрического генерирования при низких температурах в литературе уделено крайне мало внимания [1].

Во многих известных теоретических моделях допускается, что температура горячего (холодного) спая равна температуре горячего (холодного) потока в этой точке, т. е. не учитывается уменьшение температуры, обусловленное конечностью коэффициента теплопередачи из объема потока к поверхности спая. В ряде аналитических моделей не учтено, что в реальных системах наблюдается непрерывное падение температуры горячего потока и увеличение температуры холодного потока [4, 5].

Многоканальные термогенераторы, которые используют низкопотенциальное тепло, в частности, тепло океана, состоят из большого количества полупроводниковых термоэлементов, размещенных в небольшом объеме [6, 7]. В такой системе расположение холодного и горячего потоков может быть продольным, встречным (противоток) [4, 8] или поперечным

[9]. Для таких термогенераторов важным является согласование системы теплообмена, конструктивных параметров и свойств термоэлектрических батарей.

Целью данной работы является создание аналитической модели термоэлектрического генератора (ТЭГ) с низкотемпературным источником тепла для оптимизации его по энергетическим характеристикам.

Схема низкотемпературного термоэлектрического генератора показана на рис. 1, а тепловая модель для его расчета приведена на рис. 2.

На рис. 2 показаны принятые обозначения температуры  $T$  элементов ТЭГ, а также проходящих через них тепловых потоков  $Q$ . ( $T_1$  и  $T_8$  — средние значения температуры соответствующих потоков.)



Рис. 1 Функциональная модель ТЭГ

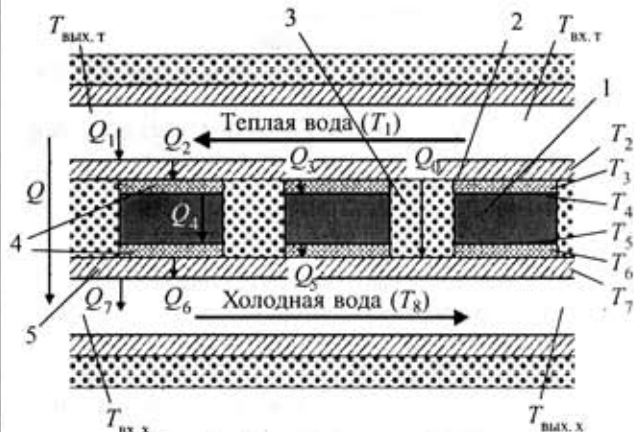


Рис. 2 Тепловая модель ТЭГ:

1 — термоэлектрический модуль; 2 — стенка теплового теплообменника; 3 — теплоизоляция; 4 — электроизоляция; 5 — стенка холодного теплообменника

Низкотемпературный термоэлектрический генератор содержит термоэлектрическую батарею (ТЭБ), которая состоит из термоэлектрических модулей 1, расположенных между стенками жидкостных теплообменников 2 и 5. Разность температур теплой и холодной воды создает градиент температуры, необходимый для работы термоэлектрического генератора.

Методика расчета ТЭГ в соответствии с его моделью должна учитывать следующие потери:

- при теплообмене стенки 2 с теплой водой  $\Delta T_1 = T_1 - T_2$ ;
- на стенке теплового теплообменника  $\Delta T_2 = T_2 - T_3$ ;
- на слое электроизоляции на теплой стороне  $\Delta T_3 = T_3 - T_4$ ;
- на модуле  $\Delta T_4 = T_4 - T_5$ ;
- на слое электроизоляции по холодной стороне  $\Delta T_5 = T_5 - T_6$ ;
- на стенке холодного теплообменника  $\Delta T_6 = T_6 - T_7$ ;
- при теплообмене стенки 5 с холодной водой  $\Delta T_7 = T_7 - T_8$ ;
- общие потери при прохождении теплового потока  $Q$  через ТЭГ  $\Delta T_8 = T_{\text{вх.т.}} - T_{\text{вых.т.}}$ .

При построении модели термогенератора были сделаны следующие допущения:

- свойства теплоносителей, в частности плотность и удельная теплоемкость, постоянны;
- свойства термоэлектрического материала, а именно коэффициент Зеебека, удельное электрическое сопротивление и удельная теплопроводность, не зависят от температуры (поскольку в исследуемом диапазоне температур они практически постоянны [10, с. 264]);
- система адиабатически изолирована (нет потерь тепла в окружающую среду).

Алгоритм для компьютерного расчета и оптимизации ТЭГ с низкотемпературным источником тепла содержит систему уравнений теплового баланса, которая отвечает предложенной тепловой модели. Рассмотрим отдельно каждое их них.

1) *Общее уравнение теплового баланса:*

$$Q = P(T_4, T_5) + Q_1, \quad (1)$$

Общее количество тепла, которое передается от теплой воды:

$$Q = c_p M_t (T_{\text{вх.т.}} - T_{\text{вых.т.}}), \quad (2)$$

где  $c_p$  — удельная теплоемкость воды;

$M_t$  — массовый расход теплой воды.

Электрическая мощность термоэлектрической батареи является функцией разности температур ее холодного и горячего спаев и рассчитывается по формуле [11]

$$P(T_4, T_5) = \frac{\alpha_m^2 (T_4 - T_5)^2 N^2 n^2}{4(R + r')}, \quad (3)$$

где  $\alpha_m$  — коэффициент термоЭДС;

$N$  — количество термоэлектрических модулей в ТЭБ;

$n$  — количество термоэлементов в модуле;

$R$  — сопротивление внешней нагрузки;

$r'$  — сопротивление ТЭБ.

Тепло, которое передается от стенки холодного теплообменника к холодной воде, [12]

$$Q_1 = c_p M_x (T_7 - T_8), \quad (4)$$

где  $M_x$  — массовый расход холодной воды;

$$T_8 = (T_{\text{вх.х.}} + T_{\text{вых.х.}})/2.$$

Массовый расход воды вычисляется по формуле

$$M = \pi d l St \rho V,$$

где  $d$  — эквивалентный диаметр канала;

$l$  — длина теплообменника;

$St$  — число Стантона для потока воды;  $St = \alpha/c_p \rho V$ ;

$\rho$  — плотность воды;

$V$  — объемный расход воды;

$\alpha$  — коэффициент теплообмена воды со стенкой теплообменника.

2) *Уравнение теплового баланса для стенки теплового теплообменника:*

$$Q_1 = Q_2 + Q_0, \quad (5)$$

Тепло, которое передается от теплой воды к стенке теплового теплообменника:

$$Q_1 = c_p M_t (T_1 - T_2), \quad (6)$$

где  $T_1 = (T_{\text{вх.т.}} + T_{\text{вых.т.}})/2$ .

Тепло, которое передается от стенки теплового теплообменника к слою электроизоляции:

$$Q_2 = \frac{NS_m \lambda_s}{\delta_s} (T_2 - T_3), \quad (7)$$

где  $S_m$  — площадь теплоприемной поверхности модуля;

$\lambda_s$  — теплопроводность материала стенки теплообменника;

$\delta_s$  — толщина стенки теплообменника.

Тепло, которое передается от теплового теплообменника к холодному через слой теплоизоляции между модулями:

$$Q_0 = \frac{S \lambda_n}{\delta_n} (T_4 - T_5), \quad (8)$$

где  $S$  — площадь теплопередающей поверхности между модулями;

$\lambda_n$  — теплопроводность изоляционного материала;

$\delta_n$  — толщина слоя изоляции.

3) *Тепло, которое передается от слоя электроизоляции к горячему спаю ТЭБ:*

$$Q_3 = \frac{NS_m \lambda_c}{\delta_c} (T_3 - T_4), \quad (9)$$

где  $\lambda_c$  — теплопроводность материала электроизоляции;

$\delta_c$  — толщина слоя электроизоляции.

4) *Уравнение теплового баланса для ТЭБ:*

$$Q_3 = P(T_4, T_5) + Q_4, \quad (10)$$

Тепло, которое передается от горячего к холодному спаю ТЭБ:

$$Q_4 = \frac{NS_m \lambda_m}{\delta} (T_4 - T_5), \quad (11)$$

где  $\lambda_m$  — теплопроводность материала термоэлемента;

$\delta$  — высота ветви термоэлемента.

5) *Тепло, которое передается от холодного спаю ТЭБ к слою электроизоляции:*

$$Q_5 = \frac{NS_m \lambda_c}{\delta_c} (T_5 - T_6). \quad (12)$$

6) *Тепло, которое передается от слоя электроизоляции к стенке холодного теплообменника:*

$$Q_6 = \frac{NS_m \lambda_s}{\delta_s} (T_6 - T_7). \quad (13)$$

7) *Уравнение теплового баланса для теплоносителей на входе и на выходе их из теплообменников [3]:*

$$P(T_4, T_5) = \frac{1}{2} [c_p M_t (T_{\text{вх.т.}} - T_{\text{вых.т.}}) - c_p M_x (T_{\text{вх.х.}} - T_{\text{вых.х.}})]. \quad (14)$$

Исходные данные для расчета ТЭГ:

- температура теплой воды на входе в теплообменник  $T_{вх.т.} = 298$  К;
- температура холодной воды на входе в теплообменник  $T_{вх.х.} = 278$  К;
- эквивалентный диаметр канала  $d = 6 \cdot 10^{-2}$  м;
- теплопроводность материала стенки теплообменника  $\lambda_t = 160$  Вт/(м·К);
- толщина стенки теплообменника  $\delta_t = 3 \cdot 10^{-3}$  м;
- теплопроводность теплоизоляционного материала  $\lambda_n = 0,1$  Вт/(м·К);
- толщина слоя теплоизоляции  $\delta_n = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м;
- теплопроводность материала электроизоляции  $\lambda_c = 24$  Вт/(м·К);
- толщина слоя электроизоляции  $\delta_c = 6 \cdot 10^{-4}$  м;
- количество термоэлементов в модуле  $n = 256$ ;
- сопротивление термоэлектрического модуля  $r = 2$  Ом;
- теплопроводность материала термоэлемента  $\lambda_m = 1,47$  Вт/(м·К);
- высота ветки термоэлемента  $\delta = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м;
- коэффициент термоЭДС  $\alpha_m = 2,05 \cdot 10^{-4}$  В/К;
- площадь теплоприемной поверхности модуля  $S_m = 1,60 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>.

Дополнительно задаются: длина теплообменника  $l$ , количество термоэлектрических модулей в ТЭБ  $N$ , сопротивление ТЭБ  $r'$ , расход теплой  $V_t$  и холодной  $V_x$  воды, коэффициент теплообмена воды со стенкой теплообменника  $\alpha$ .

Система уравнений теплового баланса (1), (5), (9) — (14) позволяет однозначно определить значения температуры всех элементов ТЭГ. Для решения поставленной задачи эта система дополнена уравнением (3)

Параметры конструкции ТЭГ и скорость подачи теплоносителей должны быть такими, чтобы обеспечить максимальный коэффициент полезного действия ТЭГ

$$\eta = P/Q, \quad (15)$$

т. е. максимальную исходную электрическую мощность при минимальных затратах тепла.

Описанный выше алгоритм и приведенные исходные данные легли в основу компьютерной программы расчета оптимальных характеристик низкотемпературного термоэлектрического генератора.

Результатами такого расчета являются:

- 1) энергетические характеристики ТЭГ —  $P$  и  $\eta$ ;
- 2) температурные характеристики — значения  $T_1, \dots, T_8$  и  $\Delta T_4 = T_4 - T_5$ ;
- 3) параметры конструкции ТЭГ и условия его оптимальной работы —  $N, V_t, V_x$ .

Программа использована для моделирования и исследования характеристик ТЭГ с теплообменниками длиной 1 м и стандартными термоэлектрическими модулями Altec-22.

На рис. 3 приведены зависимости КПД  $\eta$  от расхода теплой и холодной воды для ТЭГ с  $N=10$ .

Из рис. 3, а видно, что максимальный КПД достигается при расходе теплой воды  $12 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с, холодной —  $12,5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с, и практически не изменяется при дальнейшем увеличении расходов. Исследованы также случаи влияния на  $\eta$  одной из расходных характеристик при стабилизации другой (рис. 3, б, в).

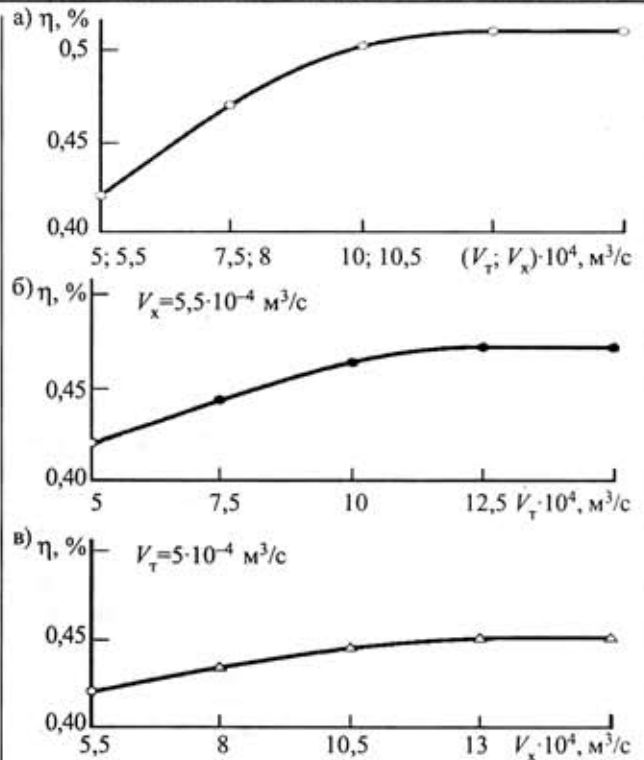


Рис. 3. Зависимость КПД термогенератора от расхода теплоносителей

Для определения оптимального количества термоэлектрических модулей в ТЭБ были рассчитаны КПД, мощность ТЭБ и  $\Delta T_4$  при разных значениях  $N$ . Увеличение количества модулей приводит к уменьшению разности температур на спаях ТЭБ, соответственно уменьшается и исходная электрическая мощность каждого модуля. В то же время электрическая мощность ТЭБ возрастает вследствие увеличения количества модулей (рис. 4). Максимум КПД 0,8% достигается в случае расположения между теплообменниками 20 модулей, при этом исходная электрическая мощность ТЭБ составляет 0,86 Вт.

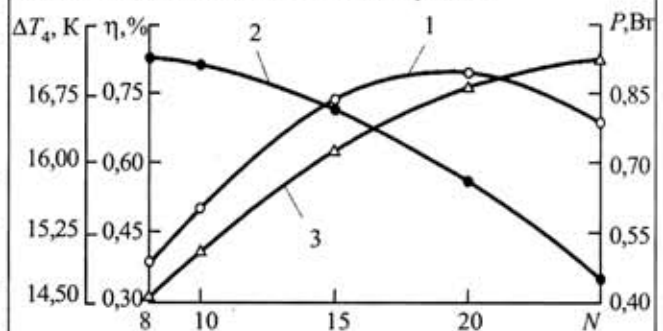


Рис. 4. Зависимость КПД ТЭГ (1),  $\Delta T$  (2) и электрической мощности (3) от количества модулей в ТЭБ

Используя формулы для расчета удельной плотности теплового потока на поверхности теплообмена [1]

$$q_1 = St_t \rho V_t c_p (T_1 - T_2); \quad q_2 = St_x \rho V_x c_p (T_7 - T_8)$$

и исходя из известных  $T_{вх.т.}$  и  $T_1$ , найдены распределения температуры теплой ( $T_t$ ) и холодной ( $T_x$ ) воды по длине соответствующих теплообменников (рис. 5), а также распределение температуры стенок теплового и

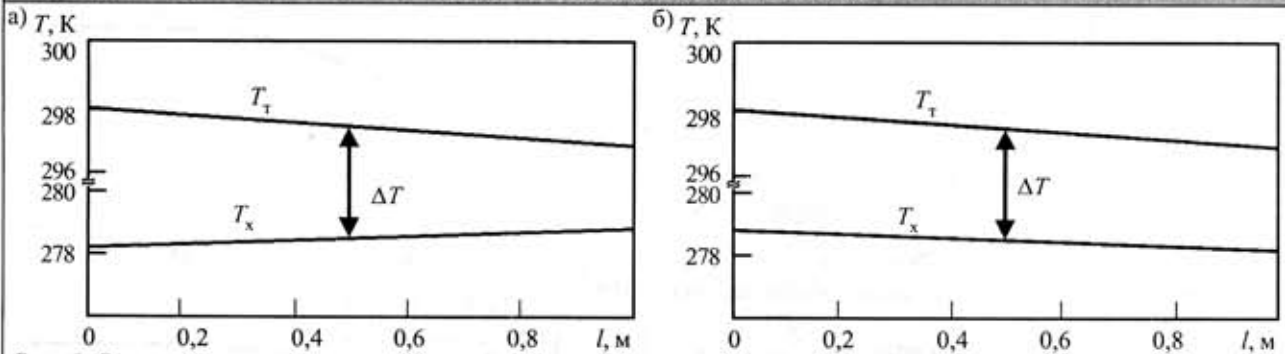


Рис. 5. Распределение температуры теплой ( $T_t$ ) и холодной ( $T_x$ ) воды по длине теплообменников при движении теплоносителей в одном (а) и в противоположных (б) направлениях

холодного теплообменников для двух случаев направления движения теплоносителей.

В отличие от случая, когда направления потоков теплой и холодной воды совпадают (рис. 5, а), при их встречном движении (рис. 5, б) разность  $\Delta T = T_t - T_x$  остается одинаковой вдоль всего ТЭГ. В таком случае обеспечивается одинаковая исходная мощность всех термоэлектрических модулей, независимо от их расположения по длине ТЭГ. Такой режим работы является предпочтительным, и поэтому в дальнейших расчетах рассматривается только модель с встречным движением теплоносителей.

На рис. 6 приведены основные характеристики ТЭГ в зависимости от величины температуры теплой воды на входе в теплообменник.

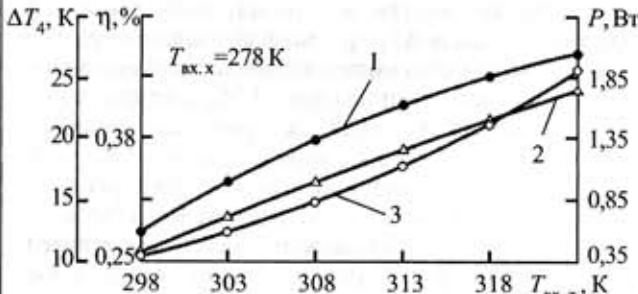


Рис. 6. Зависимость КПД ТЭГ (1),  $\Delta T_4$  (2), мощности термогенератора  $P$  (3) от  $T_{вх.т}$ .

Рассмотренная модель низкотемпературного термогенератора была использована для разработки модели ТЭГ мощностью 500 Вт.

Наиболее эффективной схемой движения теплоносителей для пакета теплообменников является схема встречных разветвленных потоков [4, 8], представленная на рис. 7.

Построение математической модели такого ТЭГ включает проведение детального анализа схемы тепловых потоков в термогенераторах разной конструкции, теплового баланса с учетом взаимного влияния теплообменников теплой и холодной воды, потерь тепла с участков теплообменников между модулями, а также расчет электрических характеристик термогенератора. Разработанная компьютерная программа позволила рассчитать электрическую мощность термогенераторов, из которых складывается пакет, исходную суммарную мощность ТЭГ, а также количество модулей, необходимое для пакета мощностью 500 Вт.

Получены следующие результаты.

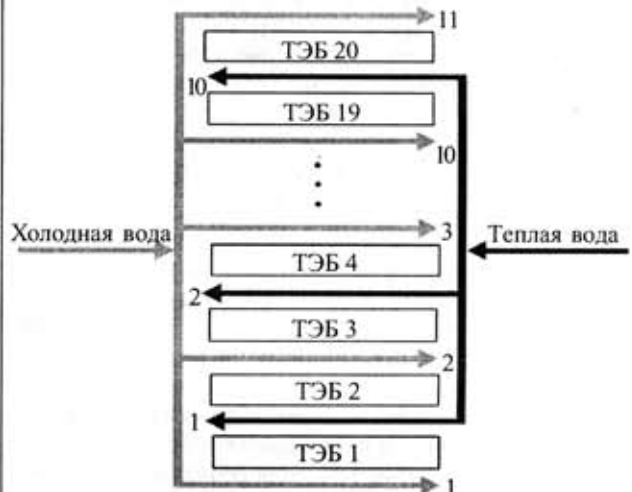


Рис. 7. Схема блока, состоящего из 20 ТЭБ

Блок из 20 ТЭБ, содержащий 400 модулей, имеет электрическую мощность 18,3 Вт. Собранные в ТЭГ 28 блоков обеспечивают 513 Вт исходной электрической мощности. Геометрические размеры такого термогенератора 1,2×1×2,24 м.

Решение системы уравнений теплового баланса для термогенератора мощностью 500 Вт позволяет построить тепловую модель пакета, найти значения температуры на поверхности всех теплообменников и на спаях ТЭБ.

\*\*\*

Таким образом, рассмотренная модель термоэлектрического генератора с низкотемпературным источником тепла позволяет оптимизировать его характеристики путем согласования системы теплообмена, конструктивных параметров термогенератора и свойств термоэлектрических батарей.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Rowe D. M. CRC Handbook of Thermoelectrics.— CRC Press: 1995.
2. Burke E. J., Buist R. J. Thermoelectric coolers as power generators // Proc. 15th International Conf. on Thermoelectric Energy Conversion.— Arlington.— 1984.— P. 91—94.
3. Matsuura K., Rowe D. M., Koumoto K. et al. Design optimisation for a large scale, low temperature thermoelectric generator // Proc. of the 11th International Conf. on Thermoelectrics.— Arlington (USA).— 1992.— P. 10—16.
4. Mathiprakasham B., Sutikno T., Beeson J. Analytical model for predicting the performance of thermoelectric generators // Proc. of

the 14th International Conf. on Thermoelectric Energy Conversion.— Arlington.— 1982.— P. 61—66.

5. Henderson J. Analysis of a heat exchanger-thermoelectric generator system // Proc. of the 14th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference.— 1979.— P. 1835.

6. Bell L. E. High power density thermoelectric systems // Proc. of the 23rd International Conf. on Thermoelectrics.— Adelaide (Australia).— 2004.— P. 149.

7. Bell L. E. Alternate thermoelectric thermodynamic cycles with improved power generation efficiencies // Proc. of the 22th International Conf. on Thermoelectrics.— La Grande-Motte (France).— 2003.— P. 558—562.

8. Suzuki R. O., Tanaka D., Toda S. Mathematical simulation of thermoelectric power generation with the multi-flat-panels // Ibid.— P. 550—553.

9. Benson D. K., Jayadev T. S. Thermoelectric energy conversion. Economical electric power from low grade heat // Proc. of the 3rd International Conf. on Thermoelectric Energy Conversion.— Arlington (USA).— 1980.— P. 27—56.

10. Анатъчук Л. И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник.— Киев: Наукова думка, 1979.

11. Matsuura K. Large scale thermoelectric generation of low-grade heat, the future // Proc. of the 12th International Conf. on Thermoelectrics.— Yokogama (Japan).— 1994.— P. 439—446.

12. Григорьев В. А., Зорин В. М. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент.— М.: Энергоатомиздат, 1982.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

8-я СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ

# ЭНЕРГЕТИКА. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. АВТОМАТИКА.



6-9 июня, 2006 г.  
Донецк, Украина

Тел./факс: +38 (062) 381-21-50 381-21-41 (0622) 57-07-92  
E-mail: Zaharov@expodon.dn.ua,  
Borisenko@expodon.dn.ua,  
Nafaty@expodon.dn.ua  
<http://www.expodon.dn.ua/electrotech>

**Самовольное посещение запрещено**  
**ЭКСПОДОНЕСС**  
ул. Чистопольская, 189-а, Донецк, Украина, 83048

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

- Исследование примесного фотоэффекта в двухбарьерных  $p-n-m$ -структурах. (Узбекистан, г. Ташкент)
- Разработка и исследование газовых лазеров для телекоммуникаций. (Украина, г. Львов)
- Анизотропные термоэлектрические координатно-чувствительные линейки. (Украина, г. Черновцы)
- Исследование собственных и примесных точечных дефектов в сапфировых подложках люминесцентными методами. (Украина, г. Ужгород)
- Датчики на основе линии задержки на ПАВ для дистанционного контроля физических параметров. (Россия, г. Вологодск)
- Конденсор тепловой трубы на основе лазерного рефрижератора. (Россия, г. Таганрог)
- Фотоэлектрические параметры гетеропереходов  $\text{SnS}_2-x\text{Se}_x-\text{InSe}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ). (Украина, г. Черновцы)
  - Оценка перераспределения потенциала в трехбарьерной структуре. (Узбекистан, г. Ташкент)
  - Конструктивно-технологические особенности автодинных гибридно-интегральных схем КВЧ на диодах Ганна. (Россия, г. Томск)
  - Новые волоконно-оптические зонды для абсорбционного анализа. (Украина, г. Киев)
  - Светонзлучающие диоды белого света: состояние и основные тенденции развития. (Украина, г. Львов, г. Киев)

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

К. т. н. Л. А. МИХЕЕНКО, к. т. н. В. Н. БОРОВИЦКИЙ

Украина, НТУУ «Киевский политехнический институт»  
E-mail: volodymyr\_borovytsky@iss.org.ua

Дата поступления в редакцию  
17.10 2005 г.

Оппонент к. т. н. С. А. ГОРЬЕВ  
(ОНИИТТ, г. Одесса)

## ОСВЕТИТЕЛЬНЫЙ КАНАЛ ЦИФРОВОГО ОПТИЧЕСКОГО МИКРОСКОПА НА БАЗЕ ДИФФУЗНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

*Исследованы диффузные излучатели на основе интегрирующих сфер малого размера в качестве источников излучения в цифровых оптических микроскопах.*

Оснащение оптических микроскопов цифровыми камерами, которые соединены с персональными компьютерами с программами цифровой обработки изображений, существенно расширяет возможности наблюдения образцов [1, 2]. Во-первых, появляются возможности улучшения качества изображений цифровыми методами, автоматического анализа формы, размеров и ориентации наблюдаемых объектов. Во-вторых, существенно упрощается процесс получения, хранения, пересылки и визуализации изображений. В-третьих, персональный компьютер делает возможным дистанционное управление работой микроскопа, что позволяет освободить человека-оператора от выполнения рутинных операций.

Следует подчеркнуть, что использование цифровых камер и программ цифровой обработки изображений не только расширяет возможности, но и накладывает дополнительные требования как к изображающей, так и к осветительной системам микроскопа (рис. 1) [3]. Для изображающей системы основным требованием является согласование оптического разрешения и периода пространственной дискретизации в цифровой камере. Это требование может быть выполнено выбором соответствующего линейного увеличения изображающего канала [3]. Для осветительного канала наиболее важным является обеспечение высокой однородности освещения в плоскости изображения изображающего канала, где располагается матрица фоточувствительных элементов цифровой камеры [2].

При визуальном наблюдении зрительная система человека-оператора способна распознавать изображения объектов на неравномерном поле. Поэтому при визуальном наблюдении от осветительного канала не требовалось обеспечение высокой однородности освещения, а в отдельных случаях небольшая неоднородность освещения искусственно вводилась для обеспечения комфортных условий наблюдения. При использовании цифровых камер для регистрации изображений требования по обеспечению высокой однородности освещения существенно возрастают [2]. Во-первых, неоднородность освещения, которая не

несет полезной информации об изображении, приводит к тому, что только часть динамического диапазона камеры может быть использована для регистрации полезной информации [4]. Это приводит к снижению контраста цифровых изображений (что в конечном счете уменьшает пространственную разрешающую способность), к полной или частичной потере информации о малоконтрастных фрагментах изображения. Во-вторых, неоднородность освещения вносит ошибки в процессы автоматического анализа, измерения и распознавания изображений, которые в большинстве случаев основываются на сравнении амплитуд различных фрагментов цифрового изображения [4]. Так, неоднородность освещенности существенно затрудняет использование пороговых алгоритмов сегментации изображений.

Существующие методы увеличения однородности освещенности можно условно разделить на две группы — программные и оптические.

Сущность программных методов заключается в использовании специализированного программного обеспечения для снижения неоднородности в цифровых изображениях, т. е. в устранении последствий неоднородности освещенности [4]. Однако использование программ связано с дополнительными временными и экономическими потерями, т. к. эти программы требуют настройки под конкретные изображения, наличия калибровочных снимков и т. п. Также следует отметить невысокую эффективность этих программ для цифровых изображений, которые содержат фрагменты с существенно отличающимися оптическими свойствами и размерами. Поэтому, несмотря на большой прогресс в области программ для цифровой обработки изображений, в цифровой оптической микроскопии актуальной задачей является разработка такой осветительной системы оптического микроскопа, которая обеспечивает наивысшую однородность освещенности в плоскости изображения изображающего канала, где располагается матрица фоточувствительных элементов цифровой камеры [5].

Важнейшими преимуществами оптических методов снижения неоднородности является, во-первых, универсальность — не требуется настройка под отдельные изображения, калибровочные снимки. Во-вторых, экономичность, т. к. нет необходимости в приобретении дополнительных программ, выделении времени на настройку программ компенсации неоднородности и обработку всех полученных изображений.

В большинстве случаев для обеспечения однородности освещенности используются диффузные оптические фильтры, оптические фильтры с переменным по полю коэффициентом пропускания, массивы микролинз, растровые и волоконные элементы, которые встраиваются в тракт осветительного канала микроскопа [6, 7]. При этом принципиальная схема освещения микроскопа в большинстве случаев остается без изменения. В ряде случаев такие решения не являются оптимальными: если используемая схема прин-

ципально не обеспечивает высокой однородности освещенности, то установка дополнительных оптических элементов не всегда может исправить характерные особенности этой схемы. Более оптимальным является поиск такой схемы освещения в оптическом микроскопе, которая принципиально может обеспечить наивысшую однородность освещенности. Поэтому целью данной работы является поиск такой схемы осветительного канала, которая принципиально обеспечивает наивысшую степень однородности освещенности изображения.

**Изображающие (проекционные) осветительные системы оптического микроскопа**

В настоящее время основной схемой осветительного канала оптического микроскопа является *схема освещения по Келеру* [8, 9]. Сущность этой схемы заключается в следующем (рис. 2):

— изображение источника излучения (в большинстве случаев это тело накала галогенной лампы или электрическая дуга газоразрядной лампы) формируется в передней фокальной плоскости конденсора. Это обеспечивает освещение поверхности наблюдаемого образца параллельными пучками лучей и тем самым исключает формирование расфокусированного изображения источника излучения на этой поверхности. При наблюдении в отраженном свете функцию конденсора осуществляет микрообъектив в обратном ходе лучей. Поэтому изображение источника излучения формируется в задней фокальной плоскости микро-

объектива; — изображение апертурной диафрагмы коллектива располагается в плоскости предметов изображающего канала (см. рис. 1). Для наблюдения поверхности образца необходимо, чтобы ее положение совпало с этой плоскостью предметов. Так как там располагается сфокусированное и четкое изображение апертурной диафрагмы, то процесс фокусировки существенно упрощается: по мере приближения поверхности образца к плоскости предмета изображение апертурной диафрагмы становится более резким. Следует отметить, что такое решение также повышает однородность освещения, т. к. распределение освещенности по полю апертурной диафрагмы достаточно однородное.

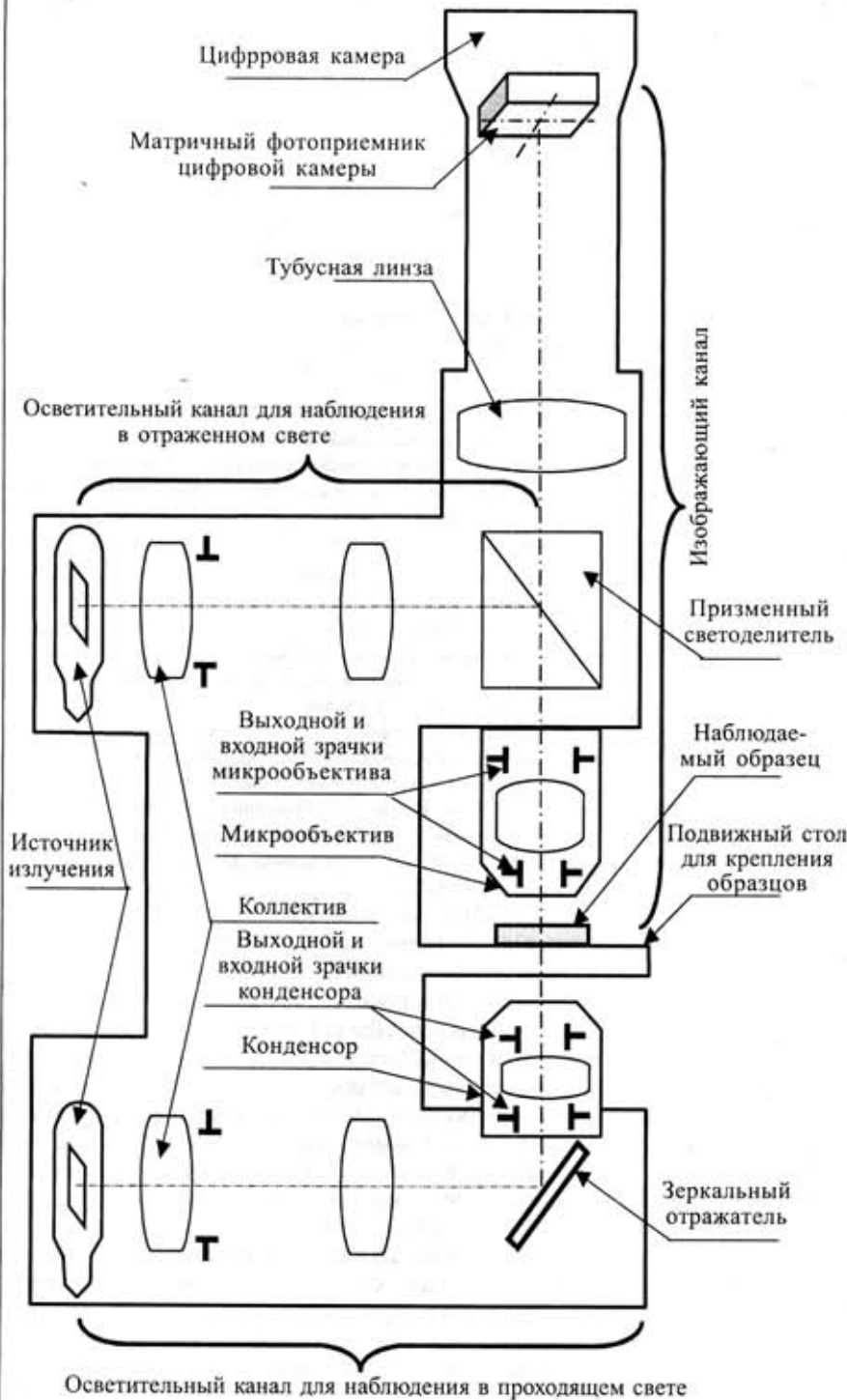


Рис. 1. Оптическая схема цифрового оптического микроскопа с осветительным каналом по схеме Келера

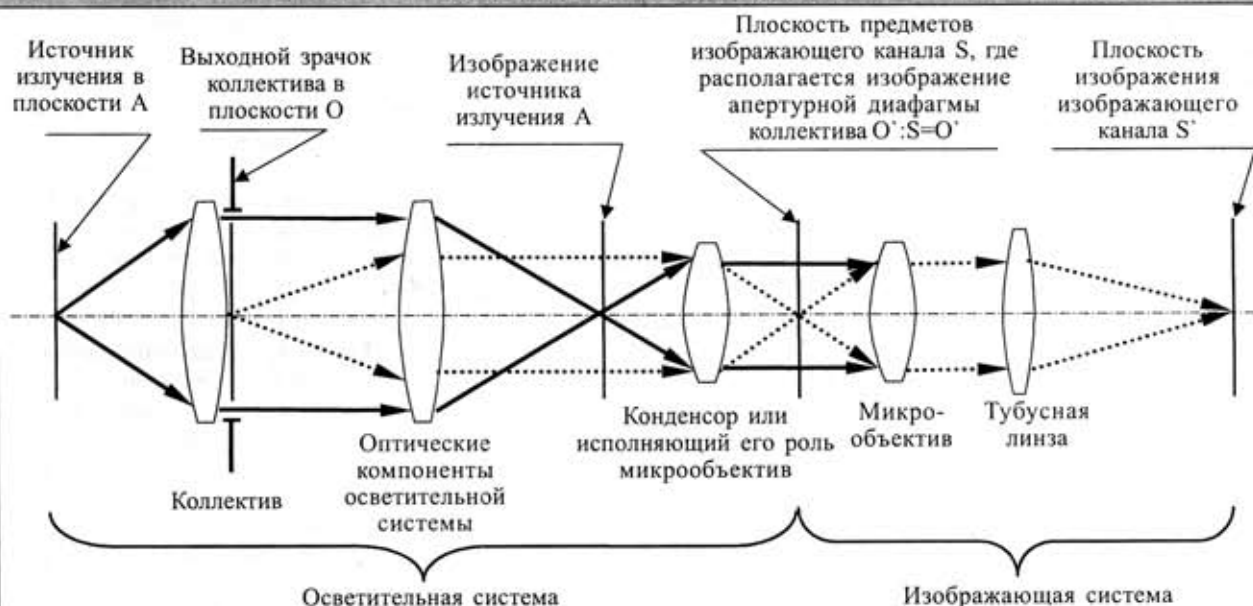


Рис. 2. Ход лучей в развернутой оптической схеме цифрового оптического микроскопа: осветительная система, в которой используется схема освещения по Келеру, и изображающая система в виде проекционной оптической системы из микрообъектива и тубусной линзы

Безусловно, схема освещения по Келеру полностью удовлетворяет требованиям к осветительной системе для визуального наблюдения — теоретически она обеспечивает однородность освещения до 98%. Однако для цифровых камер, динамический диапазон которых достигает  $2^{10}$ — $2^{14}$  (что соответствует дискретизации амплитуды с шагом 0,006—0,097%), такая однородность уже не является приемлемой для регистрации малоконтрастных объектов или объектов малого размера.

Поэтому в современных микроскопах используются различные решения для повышения однородности освещенности. Так, в микроскопах компании «Лейка» применяются оптические фильтры с переменным пропусканием в центральной и краевых областях [5]. В микроскопах компании «Цейсс» используются специальные диффузионные оптические фильтры [9]. Также известны оптические методы повышения однородности, которые основаны на использовании растровых элементов из множества микролинз, волоконных шайб и ввода излучения в осветительную систему при помощи нерегулярных оптических волокон.

Эти решения, безусловно, повышают однородность освещенности, однако их использование не может полностью устранить следующие недостатки схемы освещения по Келеру с точки зрения обеспечения однородности освещения:

1. Для сбора как можно большей части оптического потока от источника излучения в микроскопе устанавливается коллектив с большой числовой апертурой. Ввиду того, что источник излучения — нить накала или газовый разряд — имеет определенную форму и конечные размеры, а числовая апертура является большой, то лучи, проходящие через краевые зоны коллектива, имеют значительный наклон к излучающей поверхности источника излучения. В результате плоскость апертурной диафрагмы коллектива, изображение которой формируется в плоскости предметов, освещена неравномерно. Как следствие, неравномерно освещается и поверхность образца.

2. При наблюдении в отраженном свете для обеспечения больших увеличений используются микрообъективы с малым фокусным расстоянием (1—2 мм) и большой числовой апертурой (0,9—1,4), которые выполняют роль конденсора осветительной системы. При наблюдении в проходящем свете также существует необходимость в использовании конденсоров с числовой апертурой, сравнимой с числовой апертурой микрообъективов, и которые также имеют малые фокусные расстояния. Из-за этого освещение

поверхности образца осуществляется параллельными пучками лучей, которые в краевых зонах поля зрения изображающего канала могут иметь значительный наклон к оптической оси микроскопа. В результате центральная зона поля зрения будет освещена сильнее, чем краевые области, что и обуславливает неоднородность освещенности на поверхности образца.

К перечисленным выше причинам неоднородности следует добавить такие факторы как наличие виньетирования наклонных пучков в осветительном и изображающем канале. Также определенный вклад вносит то, что при формировании изображений освещенность в центральной зоне формируется пучками лучей, которые имеют меньший наклон к оптической оси, чем пучки лучей, формирующие изображение в краевых зонах. Однако при малых размерах объектов (по сравнению с фокусными расстояниями соответствующих оптических систем) влияние этого фактора достаточно мало. Так, в изображающем канале поле зрения  $\pm 12,5$  мм в плоскости изображения при фокусном расстоянии тубусной линзы 200 мм соответствует достаточно малому углу наклона лучей ( $3,57^\circ$ ).

Таким образом, схема освещения по Келеру соответствует требованиям к осветительным системам для визуального наблюдения объектов, но имеет принципиальные ограничения с точки зрения обеспечения однородности освещения при использовании микрообъективов с большим увеличением. Это влияние неоднородности освещенности существенно усугубляется при использовании новых мегапиксельных цифровых камер с большими матрицами фоточувствительных элементов — от  $12,7 \times 9,5$  мм до  $15 \times 15$  мм вместо широко распространенных цифровых камер формата 2/3 дюйма —  $8,8 \times 6,6$  мм [1, 2]. Большие матрицы этих цифровых камер накрывают большую часть поля зрения изображающей системы, в том числе крайние зоны, где присутствует значительная неоднородность освещения.

Кроме схемы освещения по Келеру, известна схема критического освещения [8, 9]. Сущность критического освещения заключается в том, что изображение тела накала формируется на поверхности на-

блюдаемого образца, т. е. в плоскости  $O'$  (см. рис. 2) [8, 9]. Главным преимуществом такой схемы является потенциальная возможность получения высокой однородности освещения. Это обусловлено тем, что однородность освещенности изображения будет определяться однородностью яркости источника излучения. Такая схема может иметь такой же высокий коэффициент использования излучения, как и схема освещения по Келеру.

На практике обеспечение однородности и стабильности яркости источника излучения связано со значительными трудностями. Так, большинство экспериментов по созданию ламп со сплошным протяженным телом накала, которые имеют однородную яркость, не были успешными, это стало непреодолимым препятствием для широкого распространения схемы критического освещения в оптических микроскопах.

Также известна схема освещения, в которой изображение тела накала проецировалось в плоскость зрачка объектива [10]. Такая схема освещения получила широкое распространение в кинопроекционной технике, но редко упоминается в публикациях по оптической микроскопии [8, 9].

**Осветительный канал оптического микроскопа на базе диффузного излучателя**

*Принципиальная схема осветительного канала с диффузным излучателем.*

Обратим внимание на следующие обстоятельства: в схеме освещения по Келеру выходной зрачок коллектива играет роль вторичного излучателя, который проецируется в плоскость предмета микрообъектива. В схеме критического освещения изображение источника излучения проецируется в плоскость предмета микрообъектива. Очевидно, что если бы выходной зрачок коллектива удалось бы сделать протяженным равномерным излучателем, то такая схема освещения была бы наилучшей и свободной от перечисленных выше недостатков схем освещения по Келеру и критического освещения.

Известно, что в оптических измерениях используется протяженный равномерный излучатель на основе интегрирующей сферы. Этот излучатель широко используется в спектроскопии, измерениях лучистых потоков, измерениях характеристик оптических

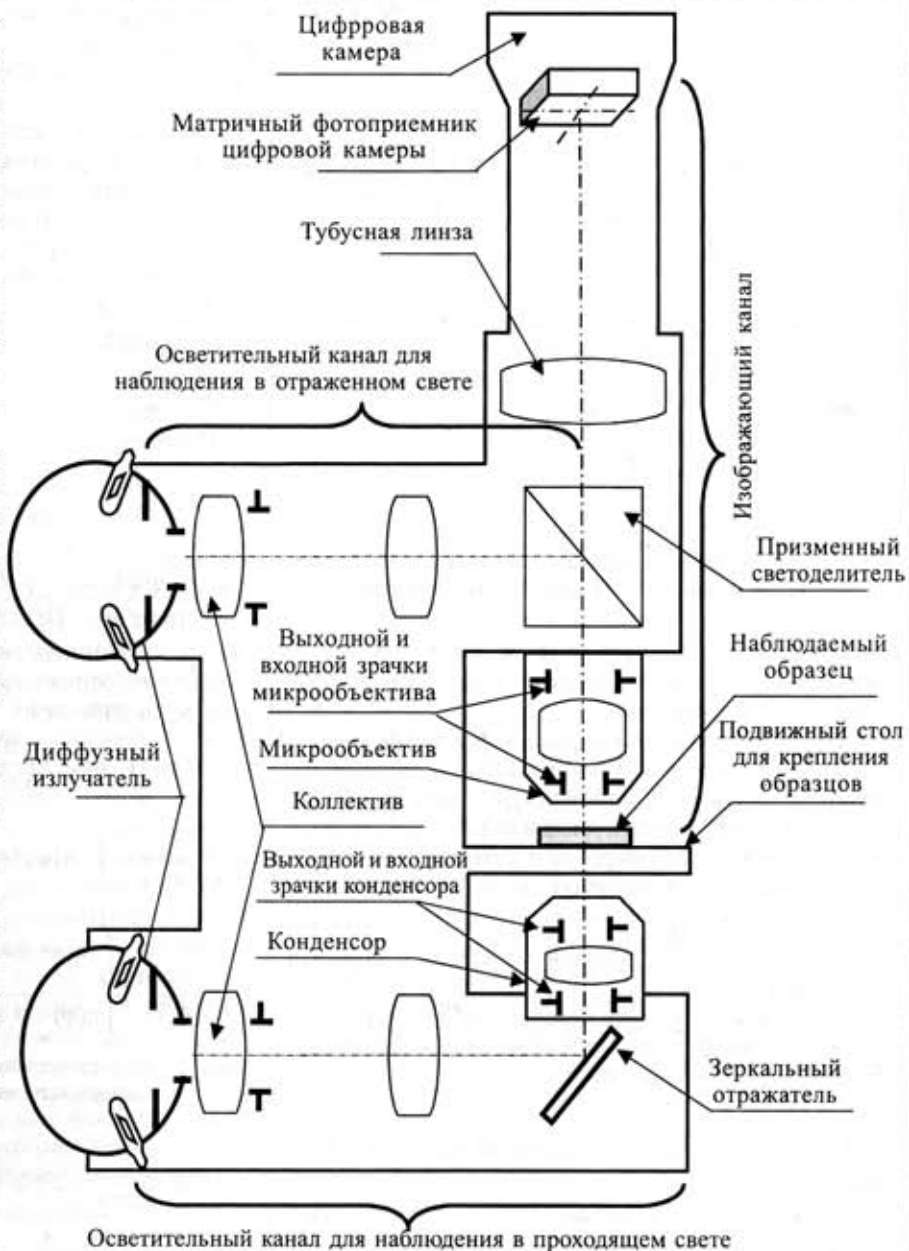


Рис. 3. Оптическая схема цифрового оптического микроскопа с осветительным каналом на базе диффузного излучателя

систем и т. п. Если в качестве источника излучения выбрать диффузный излучатель на основе интегрирующей сферы малого диаметра, то данная схема освещения будет как раз и обладать таким качеством как однородность освещенности, которое необходимо уже и для оптической микроскопии (рис. 3). Однако для реализации данной схемы освещения необходимо иметь соответствующие методики расчета и рекомендации для научно обоснованного выбора параметров излучателя.

*Яркостное поле выходного зрачка ДИ.*

Рассмотрим формирование освещенности внутренней поверхности сферы, воспользовавшись методом последовательных отражений [11, 12]. Пусть внутрь сферы от источника излучения попадает монохроматический поток  $\Phi_0$  и в районе точки  $M$  освещает некоторый элемент поверхности  $dA_M$  (рис. 4).



Рекомендуемые источники излучения для диффузных излучателей цифровых оптических микроскопов

Тип лампы	Напряжение, В	Мощность, Вт	Продолжительность горения, ч	Габаритные размеры (не более), мм		Световой поток, лм
				Длина с учетом выводов	Диаметр	
КГМ 9-75	9	75	55	45	11	35*
КГМ 12-100	12	100	85	44	11	3000
КГМ 24-150	24	150	50	47	12,5	5000
КГМ 24-250	24	250	50	55	13	8500
КГМ 30-300-2	30	300	55	55	15	35*

\* Габаритная яркость  $\times 10^6$  Кд/м<sup>2</sup>.

катрисы излучения источника и любом пространственном распределении потока после отражения от внутренней поверхности. Тогда, считая внутреннюю поверхность сферы ламбертовским отражателем [10], получаем:

$$E_{\Sigma} = \frac{\rho\Phi_0}{4\pi R^2} \frac{1}{1-\rho} \quad (12)$$

Проанализируем вклад каждого из отражений в создание суммарного яркостного поля выходного зрачка диффузного излучателя (ДИ), воспользовавшись следующими соображениями. Вид фотометрического тела элемента  $dA_M$  определяется функцией  $\eta(\varphi, \vartheta)$ , которая формируется индикатрисой источника излучения, рассеивающими свойствами покрытия и размерами освещаемой зоны (эффект усреднения). Графики коэффициентов яркости наиболее перспективных для ДИ покрытий [15—17] показаны на рис. 5. В таблице представлены отобранные нами галогенные лампы [18], имеющие относительно широкоугольные и равномерные индикатрисы излучения. Экспериментальные исследования этих ламп в комбинации с покрытиями на основе сернокислого бария и из обработанного алюминия показали, что даже при первом отражении в этом случае формируется фотометрическое тело, весьма близкое к ламбертовскому, а при последующих отражениях — практически от него не отличающееся.

Иначе обстоит дело с излучателями, имеющими узкие индикатрисы, в первую очередь светодиодами и лампами накаливания со специальным телом нака-

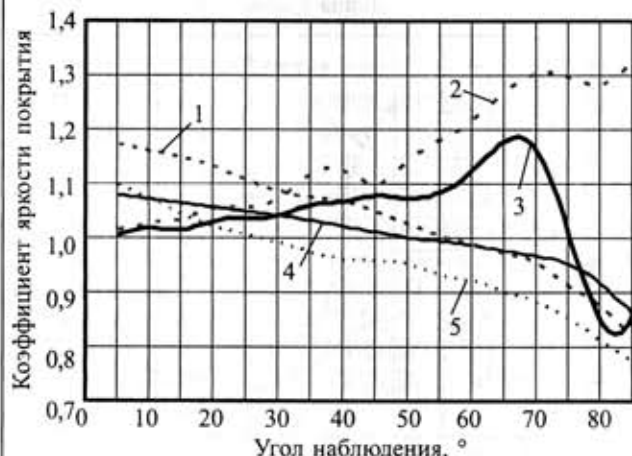


Рис. 5. Коэффициенты яркости покрытий ДИ:

1 — сернокислый барий с ацетилцеллюлозой; 2 — алюминиевый рассеиватель; 3 — прессованный порошок сернокислого бария; 4 — сернокислый барий с поливиниловым спиртом; 5 — напыленная окись магния

ла. Даже при использовании в целях усреднения значительного числа таких излучателей (в эксперименте более 12 светодиодов типа АЛ-107Б) вторичная освещенность имеет выраженный зонный характер, который полностью не сглаживается и при последующих отражениях. Фотометрическое тело при этом значительно отличается от ламбертовского.

Таким образом, если в ДИ используются рекомендуемые галогенные лампы, выражения (5), (9) и (11) для практического анализа можно упростить:

$$E_1 = E_N = \frac{\rho\Phi_0\eta(\varphi)}{4R^2\Theta} = \frac{\rho\Phi_0}{4\pi R^2}; \quad (13)$$

$$E_2 = E_K = \frac{\rho^2\Phi_0}{4R^2\Theta} A_1^0; \quad (14)$$

$$E_{\Sigma} = \frac{\rho\Phi_0}{4\pi R^2} \left[ \frac{\pi\eta(\varphi)}{\Theta} + \frac{\rho A_1^0}{1-\rho A_1^0} \right] = \frac{\rho\Phi_0}{4\pi R^2} \frac{1}{1-\rho A_1^0}. \quad (15)$$

Графики (13)—(15) показаны на рис. 6 и позволяют сделать следующие выводы.

1. Яркость выходного зрачка ДИ значительно увеличивается с ростом количества отражений.

2. Увеличение коэффициента отражения покрытия также ведет к увеличению яркости выходного зрачка, но одновременно усиливается влияние величины относительного отверстия ДИ ( $D^0$ ) на распределение освещенности в сфере. Для рассмотренных покрытий значения  $D^0$  должны находиться в пределах 0,2...0,3. При использовании покрытий с  $\rho > 0,9$  относительное отверстие ДИ следует уменьшать.

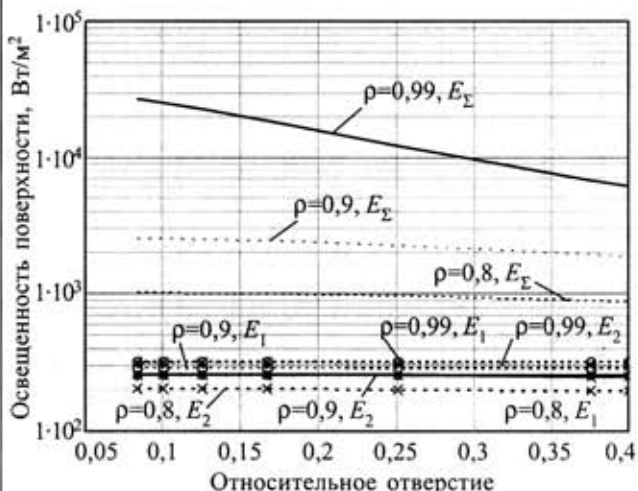


Рис. 6. Освещенность внутренней поверхности интегрирующей сферы для падающего потока  $\Phi_0=1000$  Вт и радиуса сферы  $R=0,5$  м

Если основной задачей ДИ является создание яркостного поля с высокой равномерностью, то не следует использовать высокоотражающие покрытия, особенно в комбинации с излучателями, имеющими узкую индикатрису и большое относительное отверстие.

Наиболее эффективной мерой уменьшения неравномерности яркости выходного зрачка является подбор источников излучения с минимальными размерами тела накала и широкоугольной индикатрисой. Относительное отверстие должно быть минимально возможным.

Для более точного анализа и при использовании любых источников излучения следует использовать формулы (5), (9) и (11), а функцию  $\eta(\varphi, \vartheta)$  определять экспериментально. Однако, как показала практика, сделанные выводы остаются справедливыми.

**Цветопередача.**

Цветопередача в микроскопе определяется спектральной характеристикой излучения ДИ, спектральными характеристиками пропускания осветительного и изображающего каналов и спектральной чувствительностью используемой цифровой камеры. В свою очередь спектральная характеристика ДИ формируется в основном под действием трех факторов — спектральной характеристики источника излучения, спектральной характеристики покрытия и количества эффективных отражений от стенок интегрирующей сферы. Отметим, что последнее обстоятельство

часто не учитывается, что приводит к погрешностям вычисления спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) выходного зрачка. На рис. 7 показаны спектральные характеристики покрытий, наиболее часто используемых в шаровых фотометрах и ДИ [19, 20], и на рис. 8 — СПЭЯ выходного зрачка, рас-

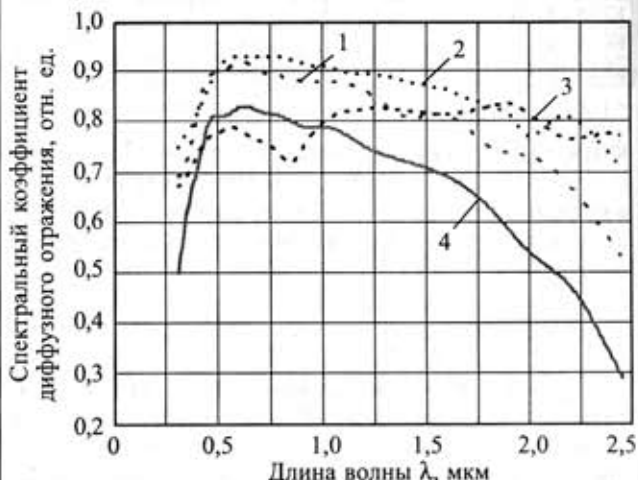


Рис. 7. Спектральные характеристики покрытий, наиболее часто используемых в шаровых фотометрах и ДИ: 1 — алюмосиликат магния в поливинилбутирале; 2 — прессованный порошок сернистого бария; 3 — алюминиевый рассеиватель; 4 — сернистый барий в этилцеллюлозе

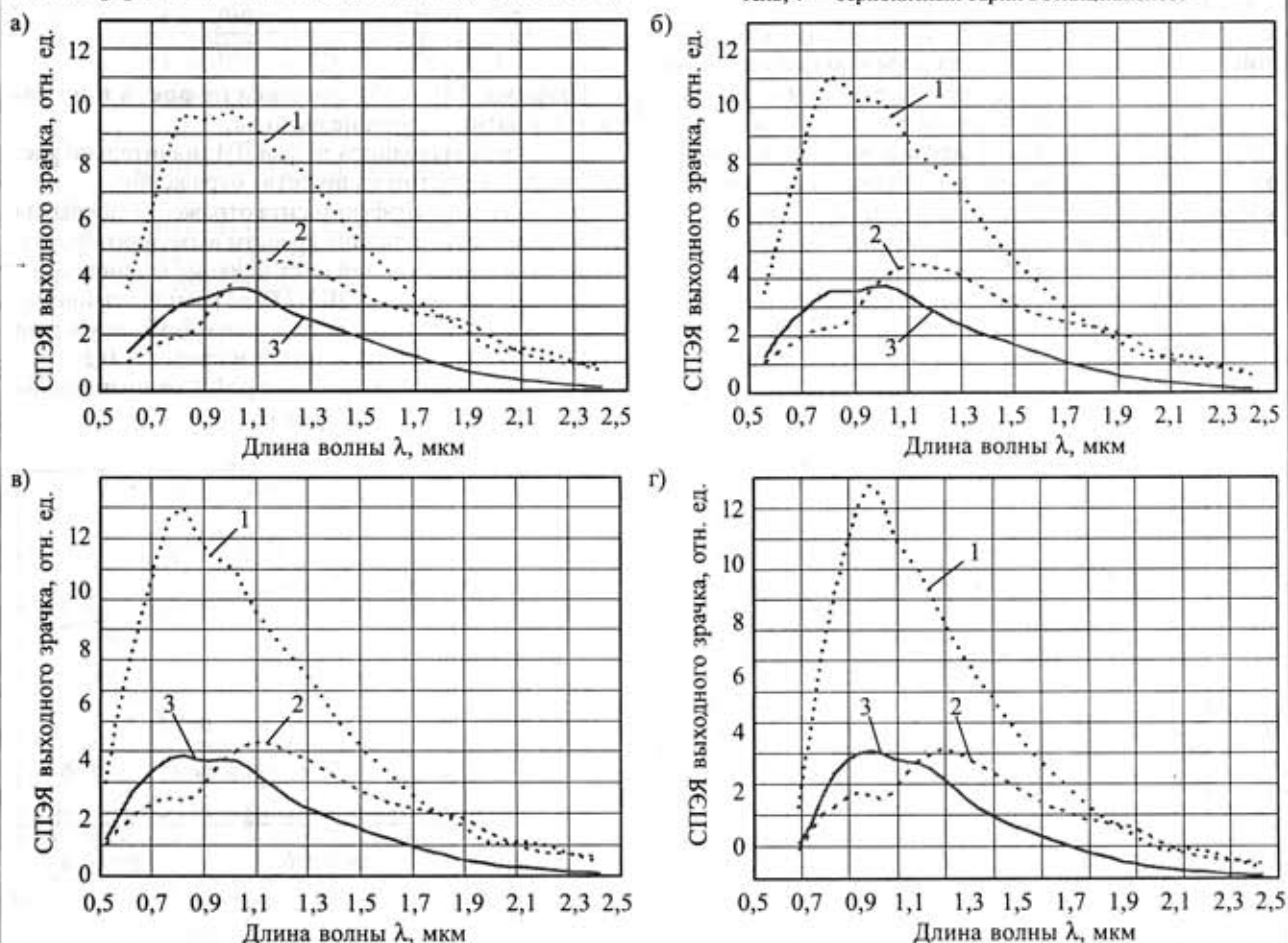


Рис. 8. СПЭЯ выходного зрачка для температур источника излучения 2400 К (а), 2600 К (б), 2800 К (в), 3000 К (г) при использовании следующих покрытий:

1 — прессованный порошок сернистого бария; 2 — алюминиевый рассеиватель; 3 — сернистый барий в этилцеллюлозе

считанная с использованием (15) при замене интегральных значений  $\rho$  и  $\Phi_0$  на спектральные  $\rho(\lambda)$  и  $\Phi_0(\lambda)$ . При этом спектральная характеристика источников излучения рассчитывалась по обычной методике [11], но с учетом поправок, определяемых по реально измеренным характеристикам некоторых ламп накаливания [17, 21, 22].

Выполненные исследования позволяют сделать ряд практических выводов.

Лучшими фотометрическими характеристиками обладает покрытие из прессованного порошка сернистого бария, но это покрытие недостаточно стойко к механическим воздействиям и быстро (в течение нескольких месяцев) заметно изменяет свои свойства. Поэтому если цифровой оптический микроскоп используется для измерения и сравнения оптических характеристик образцов, применение этого покрытия нежелательно.

Высокой стабильностью и достаточно хорошими фотометрическими свойствами отличаются покрытие на основе сернистого бария в этилцеллюлозе (для видимой и ИК-области) и покрытие из обработанного алюминия (ближняя ИК- и видимая области). Весьма перспективным для диффузных излучателей является покрытие из прессованного политетрафторэтилена [23], имеющее коэффициент отражения больше 99% от ультрафиолетовой до ближней инфракрасной области и отличающееся хорошей стабильностью, но его технология в Украине пока не освоена.

Учитывая малый срок службы галогенных ламп, наиболее приемлемых для ДИ по фотометрическим соображениям (см. таблицу), они обычно эксплуатируются при пониженном напряжении. Анализ спектральной плотности энергетической яркости выходного зрачка при различных температурах излучателей показал, что даже при использовании наименее селективных покрытий это приводит не только к количественному, но и к качественному изменению спектра излучения выходного зрачка (рис. 8), учет которого только на основе законов теплового излучения, очевидно, является некорректным.

### Заключение

Предложена новая схема освещения для оптического микроскопа на основе диффузного излучателя и теория ДИ, позволяющая в первом приближении описать формирование яркостного поля выходного зрачка и его спектральную характеристику в зависимости от конструктивных параметров излучателя и используемых элементов. Получены инженерные формулы для расчета характеристик и параметров ДИ и оценки его точности. Разработаны рекомендации по проектированию осветительных каналов оптических микроскопов по заданным параметрам, опирающиеся на доступную в Украине элементную базу.

Дальнейшая работа предусматривает уточнение предложенной схемы осветительного канала оптического микроскопа с ДИ и ее всестороннее экспериментальное исследование.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Hand W. G. A practical guide to digital microscopy // *Photonics Spectra*.— 2001.— N 11.— P. 100—104.
2. Van Vliet L. J., Boddeke F. R., Sugar D., Yong I. T. Image detectors for digital image microscopy // In: *Digital image analysis of microbes: imaging, morphometry, fluometry and motility techniques and applications, modern microbiological methods*.— Chichester: John Wiley & Sons, 1998.— P. 37—64.
3. Боровицкий В. Н. Выбор цифровой камеры для оптического микроскопа // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*.— 2004.— № 1.— С. 21—26.
4. Likar B., Maintz B. A., Viergever M. A., Pernus P. Retrospective shading correction based on entropy minimization // *Journal of Microscopy*.— 2000.— Vol. 197.— P. 285—295.
5. Schonenborn J. The illumination optics in the new Leica DM R HCS microscope system // *Leica — Microsystems Scientific and Technical Information, Edition CDR 1*.— August, 1988.— P. 37—46.
6. Варламова Л. Л., Натаровский С. Н. Увеличение центрированной части оптической системы растрового осветителя // *Оптико-механическая промышленность*.— 1990.— № 3.— С. 37—40.
7. Жидкова Н. А., Калинина О. Д., Кучин А. А. и др. Использование линзовых растров в осветителях микроскопов отраженного света // *Там же*.— 1988.— № 9.— С. 23—24.
8. Михель К. Основы теории микроскопа.— М.: Машиностроение, 1955.
9. Скворцов Г. Е., Панов В. А., Поляков Н. И., Федин Л. А. *Микроскопы*.— Л.: Машиностроение, 1967.
10. Pat. 1143287 USA. Lighting system for cinematographs / A. Kohler.— 1905.
11. Гуревич М. М. *Фотометрия (теория, методы и приборы)*.— Л.: Энергоатомиздат, 1984.
12. Рвачев В. П., Сахновский М. Ю. К теории и применению интегрального фотометра для исследования объектов с произвольными индикатрисами рассеяния // *Оптика и спектроскопия*.— 1965.— Т. 18, вып. 3.— С. 486—494.
13. Сапожников Р. А. *Теоретическая фотометрия*.— М.: Энергия, 1977.
14. Kohler A. A new system of illumination for photomicrographic purpose // *Zeitschrift fur wissenschaftl. Mikroskope*.— 1983.— N 10.— P. 433—440.
15. Кунецкий М. Г., Гуминецкий С. Г., Сахновский М. Ю. и др. Исследование коэффициентов яркости покрытий из краски на основе  $BaSO_4$  // *Оптико-механическая промышленность*.— 1981.— № 6.— С. 3—4.
16. Гутников Б. Я., Слепова В. А., Смирнова К. А. и др. Фотометрические свойства алюминиевых рассеивателей // *Там же*.— 1972.— № 8.— С. 54—56.
17. Иванов А. П. *Оптика рассеивающих сред*.— Минск: Наука и техника, 1969.
18. Лампы накаливания галогенные / *Электротехника СССР*.— Информэлектро, 1988.
19. Азаренок В. В. К вопросу покрытия фотометрических шаров // *Светотехника*.— 1978.— № 10.— С. 7—9.
20. Левинзон А. И., Королькова Н. М. Покрытие для интегрирующих сфер спектрофотометрических приборов // *Оптико-механическая промышленность*.— 1974.— № 11.— С. 33—37.
21. Смолкин М. Н., Никитичева А. М. Спектральная плотность излучения ламп накаливания // *Оптико-механическая промышленность*.— 1974.— № 9.— С. 14.
22. Бураковский Т. *Инфракрасные излучатели*.— Л.: Энергия, 1978.
23. Weidner V. R., Hisia J. J. Reflection properties of pressed polytetrafluoroethylene powder // *J. Opt. Soc. of Amer.*— 1981.— Vol. 71.— P. 856—861.

К. т. н. Ю. Э. ПАЭРАНД, к. т. н. О. И. ЗАХОЖАЙ

Украина, г. Алчевск, Донбасский гос. технический университет  
E-mail: paerand@mail.ru

Дата поступления в редакцию  
26.09 2005 г.

Оппонент д. м. н. В. Я. АКИМЕНКО  
(ИГМЭ им. А. Н. Марзеева, г. Киев)

## ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ИОНИЗАТОР ВОЗДУХА С ПЛАВНОЙ РЕГУЛИРОВКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

*Для разработанного пьезоэлектрического ионизатора воздуха предложен способ изменения концентрации производимых ионов, что позволяет регулировать производительность ионизирующих устройств.*

Воздействие техногенных процессов на окружающую среду приводит к ухудшению экологической обстановки. Вместе с тем при всем множестве контролируемых экологических факторов до последнего времени не уделялось должного внимания ионному составу воздуха. Известно [1], что нормативная величина концентрации отрицательных ионов в воздушной среде производственных и общественных помещений должна находиться в пределах от 600 до 50000 ион/см<sup>3</sup>.

Анализ существующих средств компенсации недостатка отрицательных ионов в атмосфере помещений показал отсутствие эффективных методов регулирования этого процесса. В связи с этим актуальным являются разработка и исследование специальных средств и устройств в этой области.

Среди известных способов ионизации воздуха наибольшее распространение получил способ, основанный на создании повышенной напряженности электрического поля. Анализ работы приборов на такой основе показал, что некоторые из них работают неэффективно, т. е. необходимая концентрация ионов не обеспечивается или приборы имеют узкую диаграмму направленности. Ряд приборов характеризуются чересчур высокой эффективностью, и вследствие этого около них создается зона, в которой концентрация ионов превышает санитарную норму 50000 ион/см<sup>3</sup>. К тому же высокие электрические поля приводят к образованию побочных продуктов — озона, окислов азота и др. Таким образом, одной из основных задач при создании приборов ионизации воздуха является обеспечение высокой эффективности работы устройства и минимизация или полное исключение при этом побочных вредных продуктов.

В определенной степени таким требованиям удовлетворяет ионизатор воздуха, принцип работы которого основан на использовании пьезокомпонентов [2—4]. На **рис. 1** приведена структурная схема разработанного пьезоэлектрического ионизатора воздуха.

Разработанный ионизатор воздуха ТУ У 29.2-19074892-001—2003 обеспечивает высокую произ-



Рис. 1. Структурная схема пьезоэлектрического ионизатора воздуха

водительность ионизации при низком энергопотреблении и малых габаритах. Особенностью конструкции данного устройства является частотное преобразование питающего напряжения с последующей подачей на пьезотрансформатор, обеспечивающий повышение напряжения до уровня, необходимого для питания разрядника.

Исследование эффективности разработанного устройства показало, что, несмотря на определенную направленность разрядника прибора, заметного преобладания распространения концентрации отрицательных ионов в каком-либо направлении нет. Согласно схеме, приведенной на **рис. 2**, были проведены измерения концентрации отрицательных ионов для разной удаленности и направленности ионизатора. В результате были получены диаграммы, приведенные на **рис. 3**. Как видно из диаграмм, при увеличении расстояния по всем направлениям происходит приблизительно одинаковое снижение концентрации отрицательных ионов.

Во всех известных устройствах отсутствует регулировка интенсивности ионизации, в то время как для получения необходимого уровня концентрации отрицательных ионов в помещениях различной конфигу-

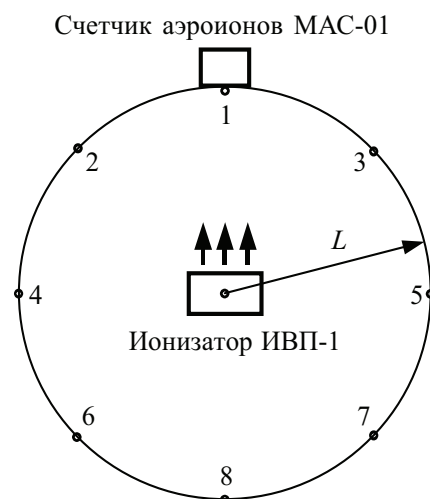


Рис. 2. Схема измерения концентрации отрицательных ионов для разной удаленности ионизатора  $L$  и его направленности

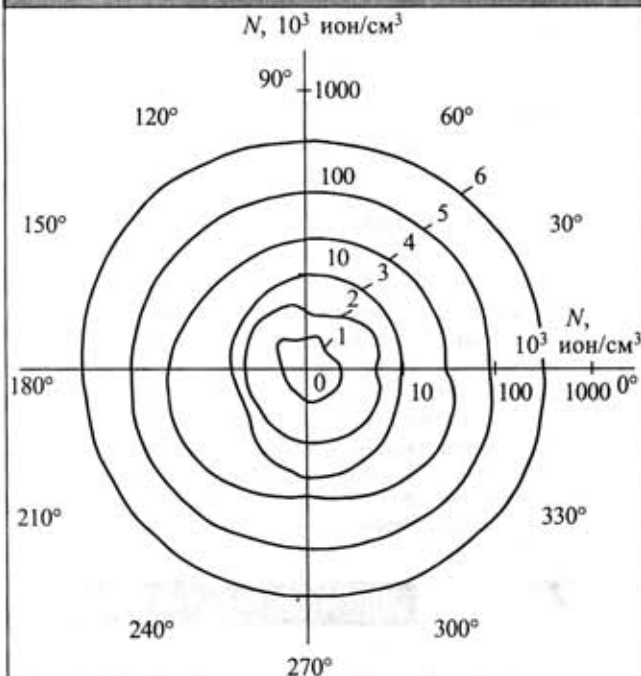


Рис. 3. Диаграмма зависимости концентрации отрицательных ионов от направленности разрядника при различных расстояниях от ионизатора до регистратора отрицательных ионов: 1 — 3,0 м; 2 — 2,5 м; 3 — 2,0 м; 4 — 1,5 м; 5 — 1,0 м; 6 — 0,5 м

рации требуется оптимизация режимов работы устройства и организация плавной настройки его производительности. Наиболее простой способ регулировки производительности заключается в изменении величины выходного напряжения. Однако такой способ сложно реализуется и ограничен нижним порогом напряжения, ниже которого процесс ионизации прекращается.

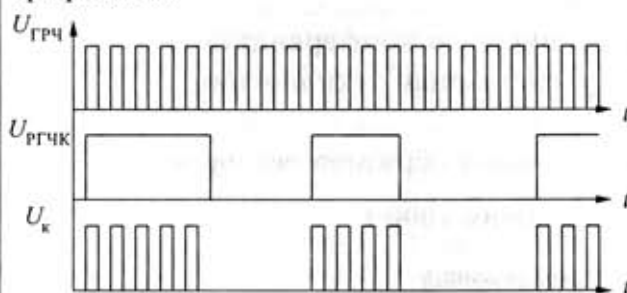


Рис. 5. Временные диаграммы работы пьезоэлектрического ионизатора воздуха с плавной регулировкой производительности

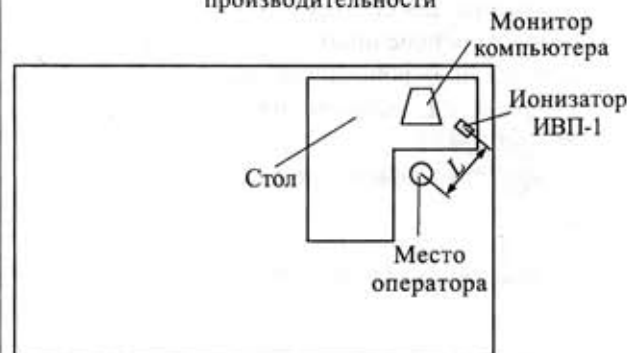


Рис. 6. Схема расположения исследуемых объектов

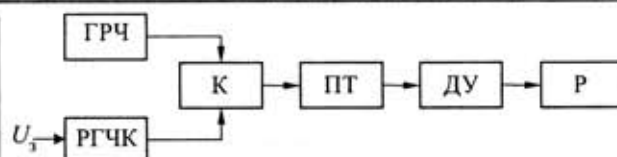


Рис. 4. Структурная схема пьезоэлектрического ионизатора воздуха с плавной регулировкой производительности

Авторами предлагается способ регулировки эффективности ионизации (применимый в разработанной конструкции ионизатора воздуха) путем введения динамической регулировки времени ионизации — за счет подачи на пьезотрансформатор питающего напряжения в виде импульсов регулируемой скважности, которые являются огибающими для импульсов напряжения резонансной частоты пьезотрансформатора. На рис. 4 приведена структурная схема пьезоэлектрического ионизатора воздуха с плавной регулировкой производительности.

Принцип работы устройства проиллюстрирован временными диаграммами, приведенными на рис. 5. Генератор резонансной частоты (ГРЧ) формирует сигнал  $U_{ГРЧ}$ , частота которого соответствует резонансной частоте пьезотрансформатора (ПТ). Регулируемый генератор частоты коммутации (РГЧК) в зависимости от задающего воздействия  $U_z$  формирует сигнал  $U_{РГЧК}$ , который определяет длительность интервалов ионизации и релаксации отрицательных ионов воздуха. Сигналы с ГРЧ и РГЧК поступают на коммутатор К, где осуществляется логическая операция «И». В результате на выходе коммутатора формируется последовательность импульсов  $U_k$ , которая через пьезотрансформатор и диодный умножитель (ДУ) подается на разрядник (Р). Таким образом, процесс ионизации периодически прерывается — при поступлении на пьезотрансформатор последовательности импульсов резонансной частоты происходит генерация отрицатель-

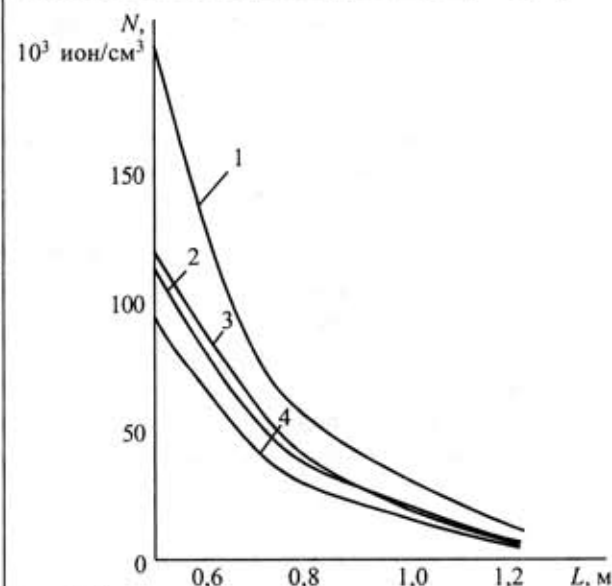


Рис. 7. Зависимость концентрации отрицательных ионов от наличия источника положительных ионов и от его удаленности:

1, 2 — монитор выключен; 3, 4 — монитор включен; 1, 3 — скважность РГЧК равна 1; 2, 4 — скважность РГЧК равна 0,5

ных ионов, а в моменты паузы имеет место процесс релаксации. То есть изменение времени импульса и паузы позволяет регулировать установившееся значение концентрации отрицательных ионов.

Исследование предложенного способа регулирования было проведено для схемы, представленной на рис. 6. При этом для компенсации недостатка отрицательных ионов использовался работающий монитор компьютера. На рис. 7 приведены результаты исследования. По характеристикам видно, что изменение скважности импульсов приводит к снижению концентрации отрицательных ионов, к тому же этот параметр находится в существенной зависимости от наличия источника положительных ионов (работающего монитора).

\*\*\*

Предложенный способ позволяет эффективно изменять концентрацию производимых отрицательных

аэроионов и создает предпосылки для создания устройств с плавной регулировкой производительности в зависимости от расположения ионизатора, конфигурации помещения, интенсивности источников положительных ионов и других факторов, влияющих на характер и условия распространения аэроионов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Санитарно-гигиенические нормы допустимых уровней ионизации воздуха производственных и общественных помещений / Збірник важливих офіційних матеріалів з санітарних протипедемічних питань. Т. 1, ч. 1.— Київ, 1995.
2. Пат. 2509 України. Іонізатор повітря // Ю. Е. Паєранд, В. М. Дорофєєв, Г. М. Соркін, Б. В. Палант.— 2004.— Бюл. № 5.
3. Пат. 2571 України. Іонізатор повітря // Ю. Е. Паєранд, Б. В. Палант, В. М. Дорофєєв, Г. М. Соркін.— 2004.— Бюл. № 6.
4. Паєранд Ю. Э., Захожай О. И. Особенности применения пьезотрансформаторов в маломощных высоковольтных источниках питания // Вестник Черкасского технологич. ун-та.— 2005.— № 3.— С. 223—226.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ



**СЕНСОРНА ЕЛЕКТРОНІКА  
ТА МІКРОСИСТЕМНІ ТЕХНОЛОГІЇ  
SENSORS ELECTRONICS  
AND MICROSYSTEM TECHNOLOGY**



Научный совет по проблеме «Физика полупроводников» Национальной Академии наук Украины, Министерство образования и науки Украины, Министерство промышленной политики Украины, Украинское физическое общество, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАН Украины, Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова

**п р о в о д я т**

**2-ю Международную научно-техническую конференцию  
«Сенсорная электроника и микросистемные технологии»  
(«СЭМСТ-2»)**

**с выставкой разработок и промышленных образцов сенсоров**

**Украина, Одесса, 26—30 июня 2006 г.**

**Научные направления конференции**

- |   |   |
|---|---|
| 1. Физические, химические и другие явления, на основе которых могут быть созданы сенсоры. | 6. Химические сенсоры.                            |
| 2. Проектирование и математическое моделирование сенсоров.                                | 7. Биосенсоры.                                    |
| 3. Сенсоры физических величин.  | 8. Материалы для сенсоров.                        |
| 4. Радиационные, оптические и оптоэлектронные сенсоры.                                    | 9. Технологические проблемы сенсорики.            |
| 5. Акустоэлектронные сенсоры.   | 10. Сенсоры и информационные системы.             |
|   | 11. Деградация, метрология и аттестация сенсоров. |
|   | 12. Микросистемные технологии (MST).              |

Оргкомитет «СЭМСТ-2»: НИЛ - 3

Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова; ул. Дворянская, 2, г. Одесса, 65026, Украина,

тел./факс +38(0482)-23-34-61, +38 (048) 726 63 56, Лепих Ярослав Ильич

E-mail: semst-2@ukr.net, semst-2@onu.edu.ua, ndl\_lepikh@mail.ru

<http://www.onu.edu.ua/ru/conference/semst2.html>

Е. А. АЛЕЙНИКОВ, к. т. н. Е. Я. БАДИНТЕР,  
к. ф.-м. н. А. М. ИОЙШЕР, Н. И. ЛЕПОРДА, А. Т. РЫБАЛКА

Дата поступления в редакцию  
28.09 2005 г.

Республика Молдова, г. Кишинев, Институт ELIRI s. a.; Лаборатория LISES  
Email: ioisher@eliri.md

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

## ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ МИКРОДАТЧИКИ ПОЛОЖЕНИЯ НА БАЗЕ ГЕРМАНИЕЕВОГО МИКРОПРОВОДА

*Создан гальваномагниторекомбинационный микродатчик на базе германиевого микропровода. Рассмотрена возможность использования таких микродатчиков в качестве датчиков положения.*

Во многих современных устройствах контроля положения и больших перемещений требуются чувствительные элементы минимальных размеров. Это позволяет повысить точность определения координат объекта на плоскости. В частности, такие измерения актуальны при невозможности (или нежелательности) использования оптических методов контроля положения объекта, например в пыльном помещении производственного цеха.

Аналогичная задача определения координат объекта внутри организма человека или животного (для относительно небольших перемещений зонда — менее 1 м) актуальна в области биомедицинских исследований.

Наиболее распространенный способ реализации координатно-измерительных устройств для описанных систем основан на так называемом электромагнитном амплитудном методе, который включает создание в зоне контроля неоднородного по амплитуде переменного магнитного поля на базе независимых или взаимодействующих своими магнитными полями источников [1]. При этом в различных направлениях, например взаимно перпендикулярных, напряженность поля обычно различается по частоте.

Одним из перспективных путей миниатюризации считывающих датчиков магнитного поля является использование гальваномагнитных датчиков [2]. В настоящей работе предлагается конструкция гальвано-

магниторекомбинационного (ГМР) микродатчика на базе литого германиевого микропровода [3], позволяющего обеспечить поперечные размеры чувствительных элементов (ГМР-элементов), входящих в его состав, не более 100 мкм.

Обычно полупроводниковые ГМР-элементы изготавливают из кристаллов, у которых на двух противоположных гранях создают различную скорость поверхностной рекомбинации (СПР). При этом диффузионная длина  $D$  неосновных носителей заряда (ННЗ) должна быть соизмерима с расстоянием между указанными гранями, т. е. именно тогда ГМР-эффект проявляется лучше всего. Классический материал для таких элементов — низколегированный германий с проводимостью  $n$ -типа, у которого  $D$  достигает сотен микрон.

Проведенные исследования показали, что в литом микропроводе (МП) из Ge(Sb) с удельным сопротивлением  $\rho$  от 10 до 50 мОм·м длина диффузионного смещения  $\lambda_d$  составляет от 50 до 150 мкм. Разработана серийно-пригодная технология изготовления германиевого микропровода с такими диаметрами жилы. При его использовании исключается необходимость в резке и шлифовке массивных кристаллов и в ряде других технологических операций. Стеклоплавильная изоляция удаляется в концентрированной плавиковой кислоте, которая растворяет стекло, не взаимодействуя с германием.

Исходный германиевый МП получают литьем из жидкой фазы в атмосфере аргона (метод Улитовского). Технология литья МП в стеклянной изоляции известна [4, с. 6—9] и сводится к следующему (рис. 1).

В запаянную с одного конца стеклянную трубку помещают навеску жидкообразующего материала



Рис. 1. Получение литого микропровода в стеклянной изоляции из жидкой фазы металлов и сплавов по методу Улитовского капельным (а) и непрерывным (б) способами

(ЖМ), закрепляют эту трубку в подающем механизме так, чтобы ее конец с ЖМ находился в рабочей зоне высокочастотного (ВЧ) индуктора. Под действием электромагнитного поля ВЧ-индуктора навеска разогревается и расплавляется, образуя раскаленную каплю. Конец стеклянной трубки при этом размягчается за счет теплопроводности и стекло обволакивает каплю ЖМ, образуя вместе с ней микрованну. Капля не прорывает стеклянную оболочку микрованны, т. к. за счет пондеромоторных сил ВЧ-поля она удерживается во взвешенном состоянии над индуктором. Из микрованны путем намотки на бобину приемного механизма вытягивают стеклянный капилляр, который непрерывно заполняется расплавом из капли. В результате остывания под индуктором расплав кристаллизуется, образуя жилу формирующегося таким образом литого МП, а стеклянная оболочка капилляра затвердевает, образуя его изоляцию.

На геометрические и электрофизические параметры МП влияет целый комплекс технологических параметров и физических свойств исходных материалов, описанный в [3]. Отметим только, что данная технология без особых усложнений позволяет получить МП с диаметром жилы от 5 до 40 мкм.

Однако при литье МП из полупроводниковых материалов следует обеспечить выполнение ряда специфических требований. В частности, для защиты микрованны от диффузии кислорода установка литья снабжена дополнительными приспособлениями, благодаря которым микрованна обдувается разогретым аргоном высокой чистоты как изнутри трубки, так и снаружи. Кроме того, из-за высокого удельного сопротивления многих полупроводников (в том числе собственно Ge и слаболегированного Ge) навеска ЖМ оказывается прозрачной для электромагнитного поля индуктора и не разогревается самостоятельно в этом поле. Поэтому требуется начальный нагрев навески (для Ge — до 200—250°C), пока не станет возможным ее самостоятельный разогрев и расплавление в индукторе на рабочих частотах 440 или 880 кГц. Для такого разогрева используется излучение кольца из силицированного графита, раскаленного в поле индуктора, либо обдув микрованны разогретым аргоном.

Получение МП диаметром до 150 мкм также потребовало некоторой модернизации существующего оборудования. В результате нами была разработана технология литья микропровода из Ge, пригодная для промышленного производства, хотя доработка оборудования еще продолжается.

Из-за того что в используемых стеклянных трубках имеются микродефекты (непровары, свилю и т. д.), а также растворенный кислород, избежать полностью дополнительного легирования микрованны при литье МП не удастся. Кроме того, из-за сегрегации примесей на фронте кристаллизации жилы и параболической формы этого фронта при литье с высокой скоростью концентрация легирующих примесей в приповерхностном слое жилы, т. е. на границе со стеклом, существенно выше, чем в центральной ее части. Поэтому технология изготовления ГМР-элементов предусматривает, помимо удаления у исходного

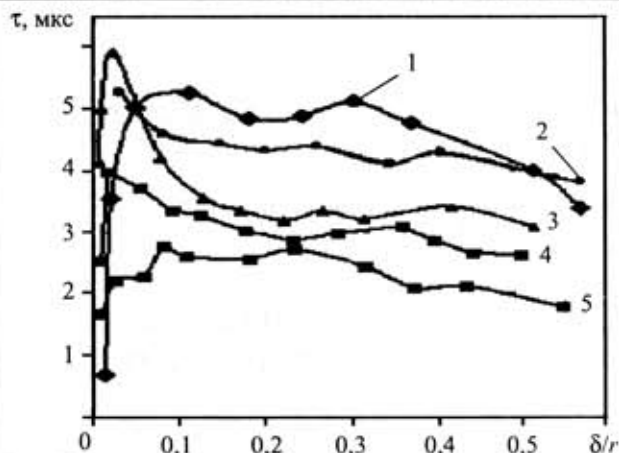


Рис. 2. Зависимость времени жизни неосновных носителей заряда ( $\tau$ ) от толщины удаленного поверхностного слоя нити германия ( $\delta$ ), отнесенной к радиусу нити ( $r$ ), для различных модификаций Ge:  
 1 —  $p$ -Ge(B),  $\rho=6,0$  мОм·м,  $2r=145$  мкм;  
 2 —  $p$ -Ge(In),  $\rho=4,5$  мОм·м,  $2r=120$  мкм;  
 3 —  $n$ -Ge(Sb),  $\rho=7,1$  мОм·м,  $2r=108$  мкм;  
 4 —  $n$ -Ge(As),  $\rho=6,4$  мОм·м,  $2r=132$  мкм;  
 5 —  $p$ -Ge(Ga),  $\rho=7,2$  мОм·м,  $2r=110$  мкм

МП стеклянной изоляции, также удаление из цилиндрической нити Ge поверхностного слоя толщиной 0,05—0,1 от ее диаметра. При этом возрастает также время жизни неосновных носителей заряда (рис. 2) и, соответственно, диффузионная длина. В общем случае в получаемых нитях германия, как уже упомянуто выше, она лежит в пределах от 50 до 150 мкм.

Для обеспечения существенного ГМР-эффекта в германиевой нити требуется прежде всего добиться низкой скорости поверхностной рекомбинации неосновных носителей заряда. Для этого использовался полирующий травитель состава  $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$  (в объемном соотношении 3:2:1) с последующей промывкой заготовки в смеси этилового спирта и ацетона высшей очистки.

Исследована зависимость минимальной СПР от удельной электропроводности нитей (рис. 3). Как видно из рисунка, с ростом  $\sigma$ , т. е. с уменьшением  $\rho$ , СПР возрастает. Значения СПР (порядка 3 м/с) достигаются при  $\sigma < 50$  Ом<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup> ( $\rho > 0,02$  Ом·м). Минимальная СПР составляет 2,5 м/с. Область с высокой СПР (80...100 м/с) реализуется на части боковой поверхности путем механической обработки (шлифовки). Такая разность СПР вполне достаточна для реализации ГМР-микродатчиков на базе микропровода из Ge.

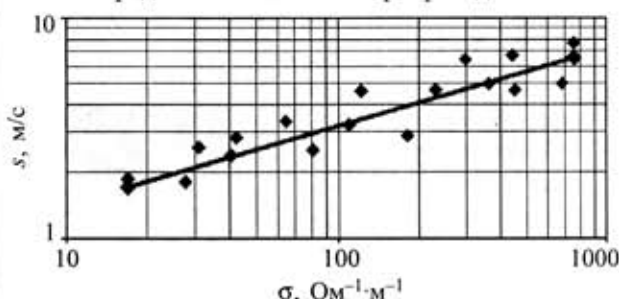


Рис. 3. Зависимость скорости поверхностной рекомбинации  $s$  микропровода из  $n$ -Ge от удельной электропроводности  $\sigma$

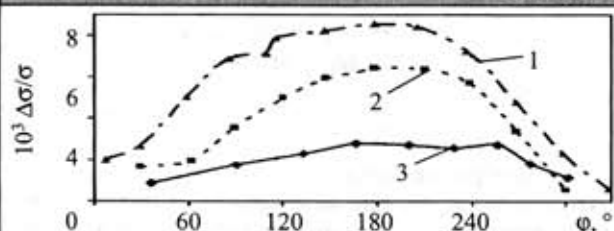


Рис. 4. Зависимость ГМР-эффекта в литом микропроводе из Ge от угловых размеров области с высокой скоростью поверхностной рекомбинации:

1 —  $\sigma=71 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$ ; 2 —  $\sigma=48 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$ ; 3 —  $\sigma=36 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$

На рис. 4 представлена экспериментальная зависимость ГМР-эффекта (относительного изменения удельной электропроводности  $\Delta\sigma/\sigma$ ) от угловых размеров области с высокой СПР для образцов с различной электропроводностью  $\sigma$  в магнитном поле  $H=2400 \text{ А/м}$ . Как видно из рисунка, максимальная чувствительность наблюдается, когда область с высокой СПР ограничена в сечении МП центральным углом  $\varphi=180^\circ$ . Однако основной вклад в ГМР-эффект вносит область с  $\varphi=120^\circ$ .

На рис. 5 представлена зависимость относительного изменения удельной электропроводности  $\sigma$  германиевой нити от ее диаметра при ГМР-эффекте в магнитном поле с индукцией  $B_z$ , перпендикулярном оси нити, и электрическом поле внутри нити вдоль ее длины  $E_x=U/L$ , где  $U$  — напряжение на образце, а  $L$  — его длина. Эта зависимость носит сложный характер и имеет вид кривой с максимумом в области значений  $2r=1,2\lambda_d$ .

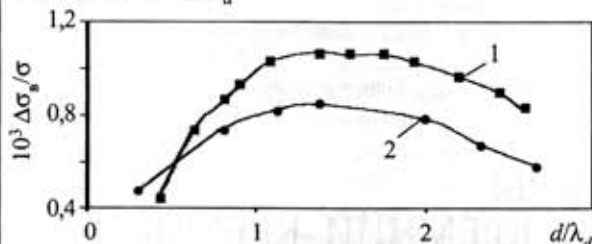


Рис. 5. Зависимость ГМР-эффекта от диаметра нитей из Ge:

1 —  $\rho=29 \text{ мОм}\cdot\text{м}$ ,  $d=280 \text{ мкм}$ ,  $\lambda_d=110 \text{ мкм}$ ,  $E_x B_z=10,5 \text{ В}\cdot\text{Тл/м}$ ;  
2 —  $\rho=16 \text{ мОм}\cdot\text{м}$ ,  $d=265 \text{ мкм}$ ,  $\lambda_d=99 \text{ мкм}$ ,  $E_x B_z=14,2 \text{ В}\cdot\text{Тл/м}$

Исходя из электрофизических параметров микропровода выбирался соответствующий диаметр жилы. При необходимости германиевая нить утонялась травлением в перекиси водорода.

Конструкция микродатчика представляет собой два отрезка микропровода без стеклянной изоляции диаметром 80—120 мкм и длиной 2,2 мм, размещенных на миниатюрной керамической или стеклотекстолитовой подложке (микроплате) параллельно друг другу на расстоянии между осями 0,4 мм (рис. 6), образуя таким образом два чувствительных ГМР-элемента в одном микродатчике. Размеры подложки 1,8×0,6×0,25 мм. Она содержит необходимые контактные площадки и дорожки.

У каждой из германиевых нитей на полуцилиндрических частях их боковых поверхностей созданы области с высокой и низкой скоростями поверхностной рекомбинации. Кроме того, на торцах нитей сформированы омические контакты, которыми они припаяны к соответствующим площадкам микроплаты.

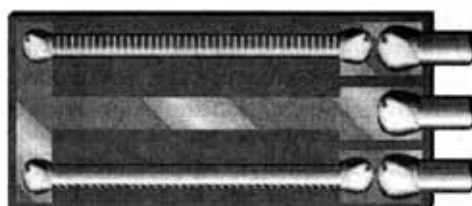


Рис. 6. Конструкция ГМР-микродатчика из Ge-микропровода

Сборка микродатчика осуществляется на программируемых установках посадки и сварки кристаллов. При этом обеспечивается размещение нитей Ge на микроплате с максимальной чувствительностью для взаимно перпендикулярных направлений магнитного поля. Три токовывода, один из которых у элементов общий, имеют диаметры с изоляцией 0,12 мм. Микроплата с закрепленными на ней элементами обеспечена защитным покрытием.

Микродатчик питается постоянным током до 2 мА. В переменном магнитном поле его выходным сигналом служит переменное напряжение  $U_c$ , не зависящее от частоты в диапазоне от 20 Гц до 50 кГц. Вольтовая чувствительность такого ГМР-микродатчика при токе питания 1,5 мА составляет 5—10 мВ/мТл, т. е. 6—12 мкВ/(А/м) для каждого из двух его элементов в направлении максимальной чувствительности. Рабочий диапазон магнитных полей, при которых относительная приведенная погрешность нелинейности рабочей характеристики ГМР-элемента  $U_c=f(H)$  не превышает 0,2%, лежит в пределах 0...20 кА/м.

На рис. 7 представлена зависимость вольтовой чувствительности  $\gamma$  от температуры окружающей среды  $T_c$  (при токе питания 1,5 мА). Температурная погрешность датчиков из германия является одним из их слабых мест. Для микродатчиков из микропровода она составляет 0,1—0,2 %/°C. В случае использования таких микродатчиков для интроскопии в медицине и биологии, где температура окружающей среды изменяется незначительно, ею можно пренебречь. В случае же их использования в производственных помещениях система обработки данных, получаемых с таких микродатчиков, должна учитывать температурную погрешность, если это необходимо для получения высоких метрологических характеристик процесса контроля положения.

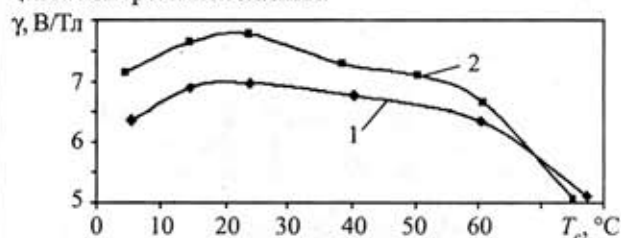


Рис. 7. Зависимость чувствительности ГМР-преобразователей из германиевого микропровода от температуры окружающей среды:

1 —  $\rho=0,031 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ; 2 —  $\rho=0,036 \text{ Ом}\cdot\text{м}$

Использование описанного микродатчика для целей определения координат требует создания комплекса магнитных полей с заданными градиентами в двух или трех взаимно перпендикулярных направлениях.

ях, причем направления напряженности самого магнитного поля зачастую можно ограничить двумя направлениями. Рабочая частота поля каждого из направлений по градиенту должна отличаться друг от друга, желательно, в 2 раза и более.

Эта сама по себе довольно сложная задача в данной работе не проводилась и не рассматривалась. Однако для оценки возможности применения ГМР-микродатчиков нами была изготовлена упрощенная модель магнитной системы, состоящая из несимметричных по числу витков колец специального типа и геометрии, оси которых размещены перпендикулярно друг другу. Питание колец осуществляется синусоидальным напряжением от генератора звуковой частоты через усилитель, обеспечивающий силу тока до 20 А. Создаваемая максимальная напряженность магнитного поля в рабочей зоне с определяющим размером до 1 м составляет 3000 А/м при градиенте 1800 А/м<sup>2</sup>. Рабочие частоты регулируются в диапазоне от 20 до 1000 Гц. Снимаемые с каждого из чувствительных элементов сигналы обеспечивают чувствительность 25 мкВ/мм на любой рабочей частоте.

Для реализации системы контроля положения выходные сигналы датчиков обрабатываются по специальной программе, учитывающей распределение в пространстве напряженностей магнитных полей раз-

ной заданной частоты, чувствительность элементов, составляющих ГМР-микродатчик и их размещение на микроплате.

\*\*\*

Таким образом, показана возможность применения гальваномагниторекомбинационных микродатчиков с двумя чувствительными элементами на базе литого микропровода для использования в устройствах контроля положения объекта. Благодаря высокой чувствительности к переменным магнитным полям, малым размерам и, соответственно, высокой разрешающей способности представляется перспективным использование таких микродатчиков в биомедицинских исследованиях.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Леонович Э. Н., Жевелев Б. Я. Расчет и проектирование электромагнитных координатно-измерительных устройств.— Минск: Наука и техника, 1989.
2. Ioisher A., Kantser V., Leporda N. Magneto-sensors based on semiconductor microwires // Sensors and Actuators.— 1996.— Vol. A 59.— P. 119—123.
3. Иойшер А., Котрубенко Б. Полупроводниковые и полуметаллические микропровода.— Кишинев: Штиинца, 1987.
4. Бадинтер Е., Берман Н., Драбенко И. и др. Литой микропровод и его свойства.— Кишинев: Штиинца, 1973.

К. т. н. И. В. БЕЛОУСОВ, д. ф.-м. н. Е. В. БУЗАНЕВА,  
д. ф.-м. н. Г. В. КУЗНЕЦОВ

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

Дата поступления в редакцию  
25.07 2005 г.

Оппонент к. т. н. Ю. Н. МАКСИМЕНКО  
(ЗАО "Укрналит", г. Киев)

## ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ «СИЛИЦИД КОБАЛЬТА–ПОРИСТЫЙ КРЕМНИЙ–КРЕМНИЙ»

*Предложена технология формирования сетки металлического электрода на основе силицида кобальта для газочувствительных поверхностно-барьерных кремниевых структур — элементов газовых датчиков.*

Комбинация в пористом кремнии его кристаллической структуры и значительной удельной площади поверхности (200—500 м<sup>2</sup>/см<sup>3</sup>) определяют интерес к использованию его в газовых сенсорах [1—3]. Одной из задач разработки сенсорных структур типа «металл—пористый кремний—кремний» является создание эффективного металлического электрода, обеспечивающего свободное проникновение молекул газа к поверхности пористого слоя и стабильную регистрацию электрических характеристик. Высокую надежность и стабильность металлизации поверхности кремния в газочувствительных структурах может обеспечить использование силицидов металлов, которые традиционно применяются в микроэлектронных приборах как ма-

териалы коммутационной разводки, барьерообразующих и омических контактов [4, с. 12—35].

Возможность создания упорядоченных структур при кристаллизации силицидного слоя CoSi<sub>2</sub> на поверхности монокристаллической кремниевой подложки исследовалась в работе [5]. Было обнаружено, что на структурных дефектах поверхности кремния в процессе экзотермической реакции происходит локальное зарождение силицидной фазы и наблюдается ее самоупорядоченный латеральный рост. Перспективность применения силицида кобальта в сенсорных структурах определяется также его высокими физико-химическими свойствами (термостабильность в кислородной среде, соответствие структурным параметрам кремния) и электрическими (отсутствие электромиграции, малые значения поверхностного удельного сопротивления).

В данной работе рассматривается возможность использования процессов силицидообразования для изготовления самоформирующейся сетки металлического электрода на поверхности пористого кремния.

В качестве подложек использовали кремниевые пластины с кристаллической ориентацией (100)*p*-типа проводимости с удельным сопротивлением 1,0—4,5 Ом·см. Слой пористого кремния (ПК) толщиной 1,0—1,5 мкм формировали при анодной обработке поверхности пластин в электролите на основе плавиковой кислоты (раствор HF в этаноле). Гальваностатический режим позволил простым выбором режима травления регулировать толщину пористого слоя и размеры пор от нескольких нанометров до нескольких микрометров.

Слой силицида  $\text{CoSi}_2$  формировали в электронно-лучевой вакуумной системе при давлении  $10^{-8}$  мм рт. ст. На кремниевые подложки предварительно наносились пленки кобальта с рассчитанной толщиной 5—10 нм (скорость конденсации 60—70 нм/мин, время осаждения 5—10 с). Формирование слоя  $\text{CoSi}_2$  осуществлялось путем отжига структур в вакууме при последовательном повышении температуры от 200 до 600°C (5—10 мин). На тыльной стороне подложки методом напыления Ni создавался омический контакт.

Морфологию пористых слоев, размеры кристаллитов и их расположение изучали методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии. Вольт-амперные характеристики изготовленных структур исследовались в туннельном спектрометре (Pt/Ir-зонд) при давлении  $P=1$  атм газовой среды воздуха или  $\text{CO}_2$ .

Особенности процесса силицидообразования на границе раздела Co/Si в системе с пористым кремнием показаны на рис. 1. Наличие слоя пористого кремния на поверхности монокристаллической пластины приводит к снижению механических напряжений при создании многослойной пленочной структуры. Взаимодействие нанесенной тонкой пленки Co с поверхностью ПК приводит к формированию наноразмерного пористого слоя силицида  $\text{CoSi}_2$  с атомарно гладкой поверхностью (рис. 1, а). Морфология пористого слоя  $\text{CoSi}_2$  определяется упорядоченной системой волнистых полосок, разделенных порами. Характерные поперечные размеры полосок — 200—300 нм, высота 100—200 нм. Типичные значения расстояния между полосками — 150—250 нм, что коррелирует

с горизонтальными размерами пор в слое пористого кремния. Как следует из рис. 1, б, в, профиль многослойных структур  $\text{CoSi}_2$ -ПК-Si характеризуется значительной пористостью (светлые участки) и образованием наноконтактов между кристаллитами кремния и слоем силицида (темные участки). Эти участки хорошо просматриваются на увеличенном изображении границы раздела  $\text{CoSi}_2$ -ПК (рис. 1, в). Над пористым слоем силицида  $\text{CoSi}_2$  просматривается изображение технологического клея.

Процесс силицидообразования между тонкой пленкой кобальта и слоем пористого кремния позволяет без применения масочных технологий травления создавать на поверхности самоформирующуюся металлическую сетку силицида  $\text{CoSi}_2$  с управляемой морфологией. Изменение свойств и состава исходной поверхности полупроводника определяется процессами расхода Si при твердофазных реакциях образования силицида, диффузией Co к границе раздела  $\text{CoSi}_2$ -Si, автодиффузией атомов Si сквозь пористый слой  $\text{CoSi}_2$  на поверхность, нарушением Si-Si связей и образованием связей Si-Co. При этом самоорганизующиеся субмикронные и наноразмерные объекты могут спонтанно развиваться как результат нескольких факторов: идущей на поверхности реакции, процессов диффузии и индуцированных осажденным веществом структурных изменений самой поверхности [5]. Их размеры контролируются конкурирующими процессами диффузии и уменьшения концентрации диффундирующих частиц Co в процессе силицидообразования. Маленькие островки растут из-за прихода новых частиц, но начинают уменьшаться, когда размеры становятся большими. В результате на поверхности пористого кремния возникают стабильные наноразмерные образования, размеры которых определяются соотношением длины диффузии и ширины области между двумя возможными поверхностными состояниями.

Для изготовленных структур в сканирующем туннельном спектрометре (Pt/Ir-зонд) наблюдались выпрямляющие диодные вольт-амперные характеристики (высота барьера Шоттки составляет  $\phi_0=0,6...0,7$  эВ).

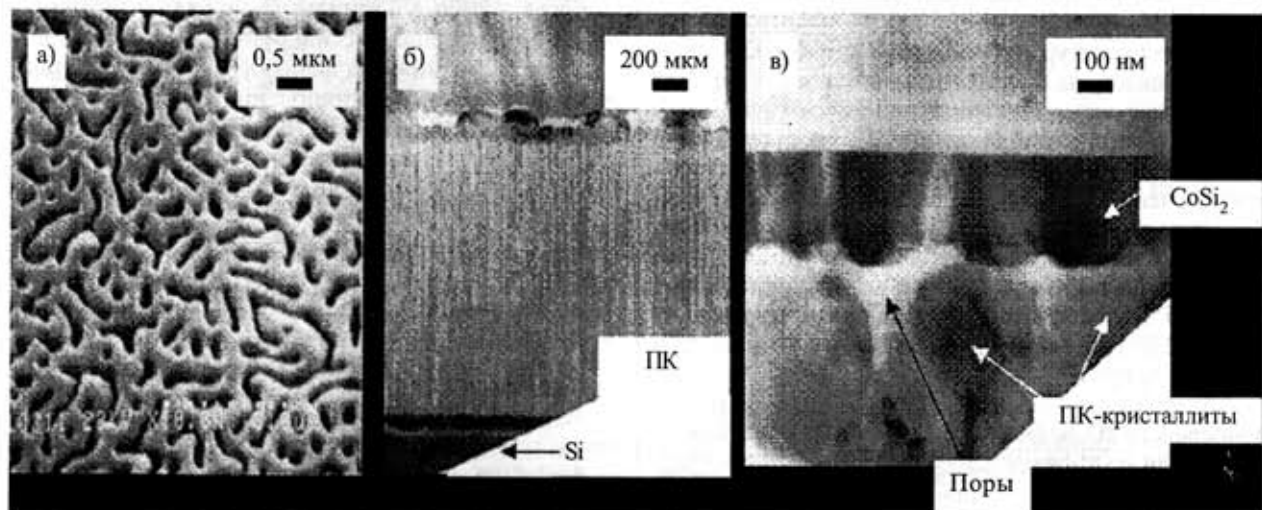


Рис. 1. Формирование силицидного контакта на поверхности пористого кремния: а — сформированная сетка силицидного контакта; б, в — профиль структуры  $\text{CoSi}_2$ -ПК-Si

Структуры демонстрируют чувствительность к составу окружающей газовой атмосферы, в частности к присутствию  $\text{CO}_2$  (как правило, пары  $\text{H}_2\text{O}$  являются обязательной компонентой контролируемых газовых смесей).

Для туннельных контактов с выпрямляющими характеристиками при приложенном постоянном напряжении наблюдаются воспроизводимые изменения тока при последовательных циклах адсорбции  $\text{CO}_2$ . Типичные изменения тока показаны на рис. 2 (при приложенном к структуре обратном напряжении  $U_{\text{обр}} = 1,2 \text{ В}$ ) для трех последовательных циклов адсорбции. Как видно из рисунка, при адсорбции  $\text{CO}_2$  ток возрастает примерно на порядок (от 3 до 20 нА) за 10–20 с и стабилизируется во время экспозиции. После прекращения подачи  $\text{CO}_2$  в результате десорбции ток понижается до первоначального значения за 30–50 с. Физическая адсорбция  $\text{CO}_2$  приводит к обратимому изменению высоты потенциального барьера контактной структуры ( $\Delta\phi_0 = 0,07 \text{ эВ}$ ). Незначительные различия между циклами адсорбции/десорбции обусловлены влиянием локальных процессов взаимодействия молекул газа с поверхностью пористого слоя.

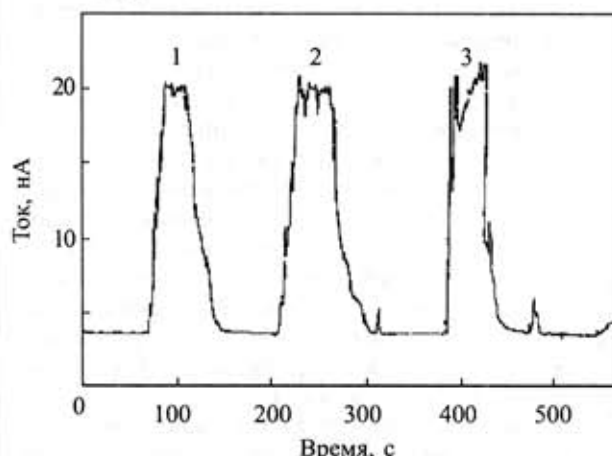


Рис. 2. Влияние последовательных (1, 2, 3) циклов адсорбции/десорбции  $\text{CO}_2$  на зависимость тока Pt/Ir-зонда в структуре  $\text{CoSi}_2$ -ПК-Si

Нагрев структур до  $T = 30 \dots 40^\circ\text{C}$  приводит к увеличению амплитуды изменения тока и росту скорости адсорбционно-десорбционных процессов. При адсорбции  $\text{CO}_2$  ток измерительного зонда возрастает от 3 до 130 нА и при десорбции уменьшается до первоначального значения за несколько секунд. При неизменной температуре наблюдается стабильное повторение изменений тока. Понижение температуры до  $20^\circ\text{C}$  приводит к обратимому уменьшению тока до исходных значений. Таким образом, изменяя температуру структуры можно управлять процессами адсорбции/десорбции  $\text{CO}_2$  на поверхности пористого слоя.

Увеличение площади "собирания" структуры при непосредственном контактировании измерительного Pt/Ir-зонда со слоем  $\text{CoSi}_2$  обуславливает рост амплитуды изменений тока при адсорбции  $\text{CO}_2$  (рис. 3). В этом случае пористый слой  $\text{CoSi}_2$  является «металлической сеткой» для газового сенсора, уменьшая

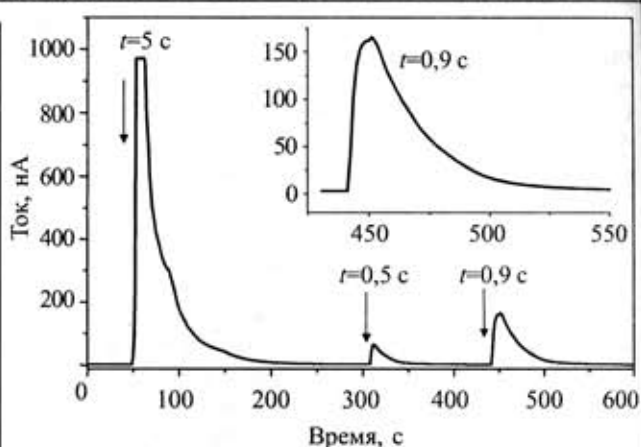


Рис. 3. Временные зависимости тока через структуру  $\text{CoSi}_2$ -ПК-Si при различном времени экспозиции  $t$  в атмосфере  $\text{CO}_2$ . На вставке показана форма максимума тока при  $t = 0,9 \text{ с}$

влияние локальных различий свойств поверхности на повторяемость адсорбционных циклов.

Как следует из рис. 3, временные зависимости тока ( $U_{\text{обр}} = 1,2 \text{ В}$ ,  $T = 20^\circ\text{C}$ ) существенно зависят от времени выдержки контактной структуры в атмосфере  $\text{CO}_2$ . При достаточно большой экспозиции в  $\text{CO}_2$  ( $t = 5 \text{ с}$ ) ток зонда приводит к перегрузке измерительного прибора (динамический диапазон изменения сигнала сенсора составляет не менее 4 порядков). При экспозициях  $t = 0,5 \text{ с}$  и  $t = 0,9 \text{ с}$  наблюдаются максимумы со временем нарастания 10 с (адсорбция  $\text{CO}_2$ ) и временем релаксации 25 с (десорбция  $\text{CO}_2$ ).

\*\*\*

Таким образом, анализ вольт-амперных характеристик структуры  $\text{CoSi}_2$ -ПК-Si показывает, что она может быть чувствительным элементом при создании газочувствительных сенсоров, а влияние адсорбции хорошо описывается в рамках модели контакта «металл—промежуточный слой пористого кремния—кремний». В процессе силицидообразования на поверхности пористого кремния создается самоформирующаяся тонкопленочная металлическая сетка силицида кобальта. Силицидный слой в таких структурах выполняет роль пассивирующего покрытия для пористого кремния и барьерообразующего материала, при адсорбции проникновение молекул газа в пористый слой происходит на границе с металлическим слоем и диффузии по порам.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Hamilton B. Porous silicon. Topical review // *Semicond. Sci. Techn.*— 1995.— Vol. 10.— P. 1187—1207.
2. Емельянов Ю. Л., Томченко А. А. Твердотельные газовые сенсоры: перспективные направления исследований // *Приборы и системы управления.*— 1998.— № 7.— С. 37—40.
3. Kilchitskaya T. S., Kozinetz V. V., Kuznetsov G. V. et al. Gas sensing properties of metal—nanocrystalline silicon—silicon heterostructures // *Photoelectronics.*— 2004.— N 13.— P. 25—29.
4. Мьюрарка Ш. Силициды для СБИС.— М.: Мир, 1986.
5. Belousov I., Grib A., Linzen S., Seidel P. Cobalt silicide formation inside surface defects of a silicon substrate // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.*— 2002.— Vol. 186.— P. 61—65.

С. В. ИОНИН

Россия, г. С.-Петербург, ООО «Петрокоммерц»  
E-mail: ionin@petrocom.ru

Дата поступления в редакцию  
29.11 2005 г.

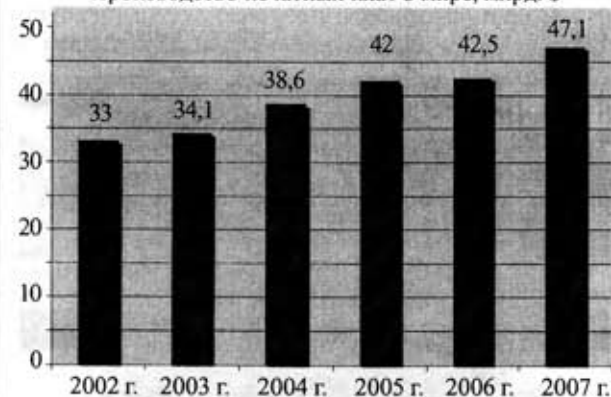
## ОБЗОР МИРОВОГО РЫНКА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

*Предпринята попытка спрогнозировать перспективные пути развития производства печатных плат в России с учетом особенностей мирового и внутреннего рынка.*

В последнее время участников отечественной электронной промышленности беспокоит мировая ситуация производства печатных плат (ПП), состояние производства в странах Юго-Восточной Азии (ЮВА) и, естественно, на предприятиях — производителях ПП России.

Данные настоящего обзора взяты из отчетов, предоставленных Европейской ассоциацией печатных плат EIPC, публикаций в журнале «CircuitTree» и статей Dr. Naoya Nakahara (N. T. Information). Представлена также экспертная оценка специалистов ООО «Петрокоммерц» текущей ситуации индустрии ПП в России.

Производство печатных плат в мире, млрд. \$



Изменения в сравнении с предыдущим годом, %

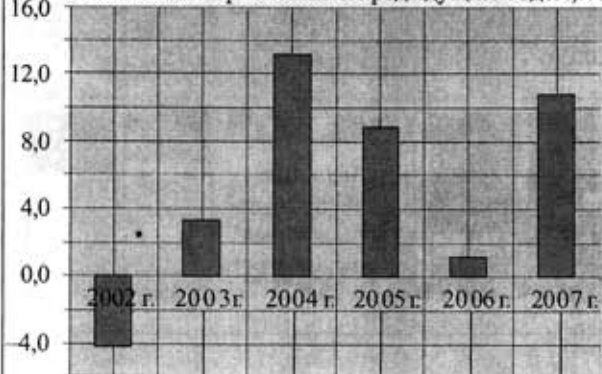


Рис. 1

Обратимся к данным по производству ПП в мире. На диаграммах **рис. 1** показаны статистические данные и представлены прогнозные оценки на ближайшие два года.

Спрос на ПП в мире продолжает расти и по итогам 2005 г. обещает быть на 9% выше 2004 г. В первом полугодии 2005 г. наблюдалось некоторое отставание от производства прошлого года. В то же время во втором полугодии ожидается значительный рост заказов на платы, который можно охарактеризовать увеличением объема мировых продаж электронных компонентов (увеличение на 9% от запланированного объема).

Подавляющую часть общей стоимости заказов 2005 г. составляют многослойные ПП — приблизительно 80%. Заказы двухсторонних ПП занимают около 12,5% и едва достигают половину от заказов 2004 г. Объем заказов односторонних печатных плат составляет незначительную долю — 7,5%, и, по прогнозам специалистов, в ближайшие несколько лет она останется стабильной (2006 г. — примерно 8%). Наибольший рост можно отметить в производстве гибких ПП: в 2005 г. объем производства увеличился на 68% относительно 2004 г.

Динамика роста производства ПП стран ЮВА 2004 г. была почти всегда линейной, даже после глобального переворота индустрии в 2000 г. Основная часть этого роста была получена за счет перемещения крупных производств из Северной Америки и Западной Европы в страны ЮВА. В те времена самые низкие производственные затраты обуславливались массовым производством и фактически бесплатной рабочей силой (минимальный оклад рабочего 69—83\$).

Деление производителей печатных плат по регионам в 2005 г.



Рис. 2

Сейчас же массовое производство в странах ЮВА диктует перераспределение издержек производителей. Мировой дефицит меди и увеличение цен на материалы для изготовления диэлектриков влияет на затраты производителей ПП, сокращая их прибыли.

В настоящее время производство в ЮВА по-прежнему продолжает расти и приближается более чем к 3/4 мирового производства ПП (рис. 2). Но производители стран ЮВА отмечают ряд проблем, который диктует другую политику производства. Отметим наиболее значимые из них:

- увеличение стоимости трудовых и сервисных затрат (особенно критичной для стран ЮВА является стоимость труда специалистов высокой квалификации);
- повышение цен на энергоносители и сырье;
- насыщение мирового рынка ПП, которое диктует более гибкую маркетинговую политику применительно к калькуляции себестоимости и поиску заказчиков.

В связи с этим специалисты отмечают снижение динамики роста производства ПП в ЮВА на конец 2005 г. до 10—11% и дальнейшее стабильное сохранение этого показателя до 2010 г. По прогнозным оценкам, мировой рост производства печатных плат к этому периоду будет составлять около 9—10%.

Оценивая сложившееся положение, западные аналитики отмечают постоянное повышение себестоимости конечного продукта, что ведет к постепенному выравниванию мировых цен на ПП. Интересно, что компании ЮВА, которые демпинговыми ценами за-



Рис. 3

хватили американский рынок, теперь жалуются на сильное снижение прибыли.

Теперь обратимся к состоянию отечественной индустрии ПП (см. рис. 3). По оценкам западных аналитиков, рост производства ПП в 2005 г. составит 6—7% и оценивается на уровне 88,4 млн. кв. дм ПП в год. Объяснить этот рост можно появлением новых производств, а также переоснащением старых. Однако по нашим экспертным оценкам примерная потребность России в ПП составляет 140—160 млн. кв. дм в год. Исходя из этих данных можно сделать вывод, что до 40% плат сейчас изготавливается за границей, в основном в странах ЮВА.

На фоне общего роста производства ПП в России можно отметить относительное сужение сектора оборонной промышленности: если в 1998 г. доля этого сектора составляла 80% от общего объема производства, то сейчас этот показатель составляет не более

Распределение размещения заказов России на производство ПП разного класса плотности в 2005 г. и прогноз на 2010 г.

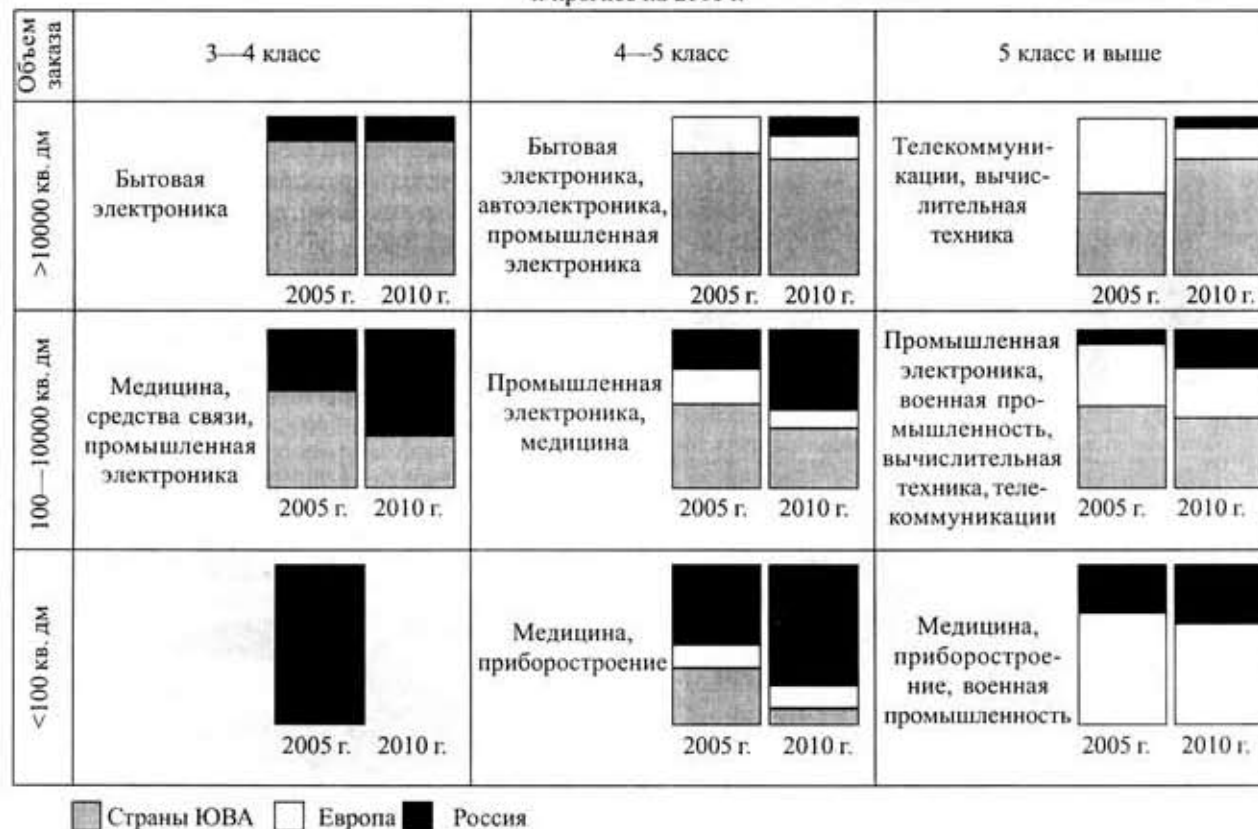


Рис. 4

60%. На большинстве предприятий России загрузка производственных мощностей составляет 30—40%. В основном это объясняется тем, что технологическое оборудование устарело как морально, так и физически. Средний возраст штатной единицы оборудования — 15 лет. Печальным является тот факт, что типичная технология российского производства ПП отстает от общемирового уровня, как минимум, на пять лет.

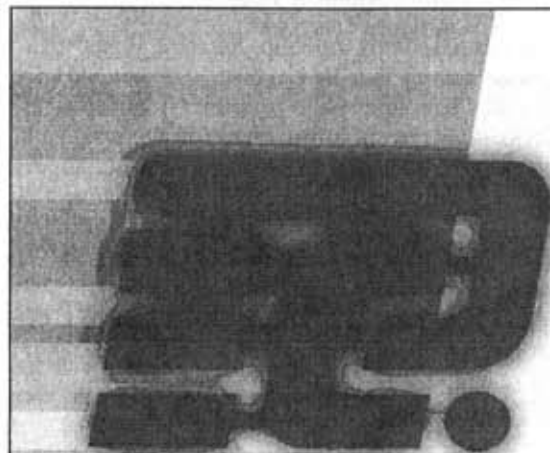
Приведем еще один интересный показатель — объем потребления электроники в стране (см. рис. 4). Рынок, на который может рассчитывать электронная промышленность, составляет по разным оценкам около пяти миллиардов долларов в год, что еще раз подчеркивает значимость отрасли.

Одной из основных ошибок российских производителей ПП является попытка охватить на одном предприятии весь спектр производства — как по классам плотности, так и по объемам выпуска. К сожалению, чаще всего это связано с отсутствием должного финансирования, глубокой маркетинговой проработки рыночной ситуации и, как следствие, с отсутствием концепции плановой реконструкции. Закупка единичных дорогостоящих позиций оборудования не даст необходимого эффекта ни по объему, ни по качеству выпускаемой продукции, если в той же технологической цепочке работают морально и физически устаревшие машины и технологии. Любое предприятие, предполагающее сохранить и развивать производство ПП, в первую очередь должно определить свою позицию на рынке — как по серийности, так и по уровню сложности продукции. Если нет возможности провести полную реконструкцию производства в короткое время, необходимо выработать единую стратегию на долгосрочную перспективу и планомерно реализовывать намеченный план.

Внушает оптимизм то, что в последние годы происходят серьезные изменения в производственных мощностях индустрии производства ПП. Сейчас полностью реконструировано или создано несколько предприятий, на некоторых происходит плановая реконструкция, в ближайшее время ожидается новое строительство или реконструкция производств.

В заключение предлагаем рассмотреть мнение о перспективах развития российского производства ПП. Точка зрения основана на том, что страны ЮВА приближаются к пику своих экспортных производственных возможностей. Первостепенной задачей индустрии ПП Китая является удовлетворение нужд постоянно развивающегося сборочного производства внутри страны, которое в перспективе будет направлено на удовлетворение внутреннего рынка. Также не стоит забывать о том, что даже по российским меркам 80% населения Китая живет в бедности, а это — более 1 миллиарда человек. Естественно, Китай и страны ЮВА останутся основными производителями ПП в крупных сериях. Однако экспортная доля средне- и мелкосерийных заказов будет иметь тенденцию к постепенному снижению.

На основании этого можно предполагать, что у российской индустрии ПП существуют определенные перспективы. Нам кажется, что в течение ближайших пяти лет в России изменятся не только объемы, но и структура производства ПП. Сейчас уже существуют производства, готовые выполнять среднесерийные заказы на платы по конкурентным с ЮВА ценам и срокам. По мере появления новых или реконструкции существующих отечественных предприятий доля заказов, размещаемых в странах ЮВА, постепенно будет уменьшаться, и соответственно доля заказов, размещаемых на внутреннем рынке России, будет увеличиваться с каждым годом.



**PetroCommerz**

**PetroCommerz**

WWW.PETROCOM.RU / INFO@PETROCOM.RU

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

191124, СУВОРОВСКИЙ ПР., Д.65

ТЕЛ: [812]274-16-55, ФАКС: [812]274-16-48

МОСКВА

117405, ВАРШАВСКОЕ ШОССЕ, Д. 125, 1 СЕКЦИЯ

ТЕЛ/ФАКС: [095]781-25-99, 938-65-05, 938-65-06

**КОМПЛЕКСНОЕ  
РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПРОИЗВОДСТВА  
ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ**

Д. т. н. С. Г. АНТОЩУК, д. т. н. В. Н. КРЫЛОВ,  
к. т. н. Г. Ю. ЩЕРБАКОВА

Украина, Одесский национальный политехнический университет  
E-mail: milit@milit.tm.odessa.ua

Дата поступления в редакцию  
26.10.2005 г.

Оппонент к. т. н. С. А. ГОРЬЕВ  
(ОНИИТТ, г. Одесса)

## ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ЧТЕНИЯ МАРКИРОВОЧНЫХ НАДПИСЕЙ КОМПОНЕНТОВ ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ

*Использование разработанных процедур позволило достичь устойчивого распознавания и обеспечить обработку изображений маркировочной надписи в реальном масштабе времени.*

Системы автоматизированного оптического контроля применяются в современном производстве печатных узлов на различных этапах технологического процесса. На ранних стадиях производства эти системы применяют на этапе установки компонентов для контроля номиналов и некорректности установки дорогостоящих компонентов с малым шагом выводов. В обоих случаях контроль проводят посредством автоматизированного распознавания маркировки компонентов на изображениях печатных узлов.

Технологии чтения маркировочных надписей компонентов должны обеспечивать инвариантность к трансформациям интенсивности изображений, к масштабу, повороту и сдвигу маркировочных надписей в поле зрения, а также обладать высоким быстродействием (объявленная скорость обработки в известных системах — несколько десятков тысяч компонентов в час [1]). В настоящее время существует ряд подходов к построению «читающих автоматов», однако информационных технологий, отвечающих всем требованиям данной предметной области, не существует, что ограничивает использование систем автоматизированного оптического контроля изделий электронной техники. Целью работы является разработка такой информационной технологии.

Структура информационной технологии включает, как правило, такие этапы [2, с. 141—150]:

- поиск характерных фрагментов, т. е. выделенные области с маркировочными надписями;
- бинаризация полученной области;
- сегментация бинаризованного изображения маркировочной надписи на отдельные символы;
- распознавание отдельных символов и всей надписи.

Целью этапа поиска характерного фрагмента является уменьшение объема обрабатываемой информации, что значительно увеличивает скорость системы контроля. Однако решение этой задачи затрудняется наличием на исходных изображениях боль-

шого количества мелких деталей. Возникает необходимость в обработке, обладающей свойствами частотной локализации, позволяющей выделить на изображении крупные компоненты, включающие маркировочные надписи, и одновременно обеспечить удаление помех и незначимых мелких деталей изображения вне характерных областей.

Традиционное решение подобной задачи предполагает два этапа обработки изображения: пространственную низкочастотную фильтрацию (для удаления помех и незначимых мелких деталей изображения печатного узла вне характерных областей); градиентный поиск (для выявления характерных областей с маркировочными надписями). Традиционны и проблемы подобного подхода: удаляются мелкие детали и из области маркировки, искажаются контуры, низка помехоустойчивость градиентных методов, невозможно для таких методов различить локальные и глобальный экстремумы, низка скорость сходимости вычислительного процесса при целевой функции типа «овраг».

В работе [3] предлагается для поиска характерной области использовать преобразование Гильберта и поисковые алгоритмы на его базе, с помощью которых удалось одновременно расширить область пространственной локализации объектов распознавания и подчеркнуть области перепадов интенсивности. Однако этот аппарат не обладает регулируемой детальностью, не позволяет вести поиск изображений объектов заданных геометрических размеров. Эти проблемы позволяют решить гиперболическое вейвлет-преобразование (ГВП) [4], сочетающее в себе преимущества преобразования Гильберта и вейвлет-преобразования.

ГВП определяется путем свертки [4]

$$HWT(s, x_0) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \Psi_{s, x_0}(x) dx,$$

где  $f(x)$  — преобразуемая (анализируемая) функция (строка либо столбец изображения);

$\Psi_{s, x_0}(x)$  — двухпараметрическая базисная функция, получающаяся из материнского вейвлета  $\Psi_0(x)$  в результате масштабирования с масштабным множителем  $s \in R^+$  и сдвига с параметром  $x_0 \in R$ .

Получены адаптивные вейвлетные функции на основании материнского вейвлета (рис. 1, а)

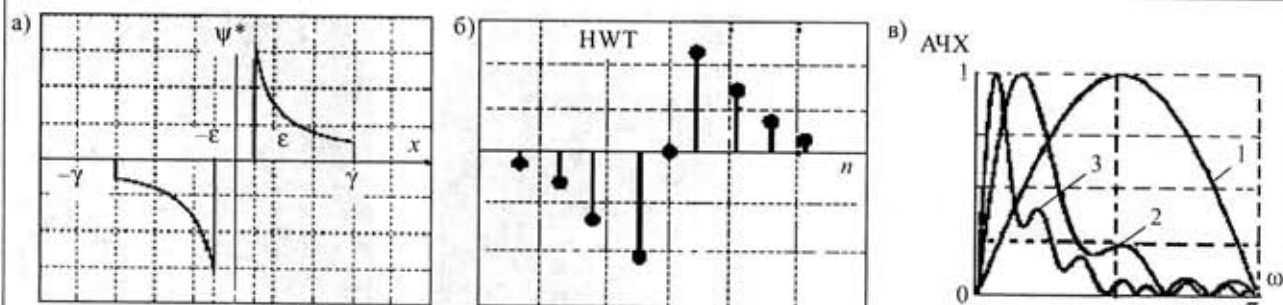


Рис. 1. Гиперболическое вейвлет-преобразование: материнский вейвлет ГВП (а); импульсная (б) и амплитудно-частотные (в) характеристики

$$\psi_0(x) = \frac{1}{\pi\alpha x} G(x),$$

где  $G(x)$  — адаптирующая функция, удовлетворяющая условиям  $G(-x) = G(x)$ ,  $G(x) = 1(x-\epsilon) - 1(x-\gamma)$ ;  $1(x)$  — единичная функция Хевисайда;  $\alpha > 0$  — масштабирующий коэффициент;  $\epsilon, \gamma$  — некоторые положительные параметры.

Дискретное ГВП некоторой дискретной последовательности  $\{f_n\}$  определяется как свертка этой последовательности с базисной функцией  $\psi_0$ , которая соответствующим образом перенормируется с масштабом  $s$  и сдвигается по пространственной шкале на интервал  $n\Delta x$ :

$$HWT(n, s) = \sum_{n'=0}^{N-1} f_{n'} \psi \left( \frac{(n' - n)\Delta x}{s} \right).$$

Дискретное ГВП функции  $f(x)$  можно рассматривать как дискретную свертку  $f(x)$  с некоторым фильтром, импульсная (на некотором масштабе) и амплитудно-частотные характеристики которого (на нескольких масштабах) представлены на рис. 1, б, в.

На малых масштабах амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) базисной функции стремится к АЧХ дифференциатора (рис. 1, в, кривая 1). Такой фильтр имеет самую широкую полосу пропускания, что определяет его низкую помехоустойчивость. С ростом порядка фильтра (рис. 1, в, кривые 2, 3) его ширина пропускания сужается, максимум характеристики смещается в сторону низких частот, что увеличивает помехоустойчивость и уменьшает влияние помех на результат преобразования. ГВП, сохраняя особенности преобразования Гильберта, обладает рядом полезных свойств с точки зрения обработки сигналов: имеет высокую, по сравнению с операцией дифференцирования, помехоустойчивость; линейно; обладает свойством частотной локализации; результат ГВП в окрестности экстремума равен нулю. Последнее свойство было использовано для разработки поисковых алгоритмов на базе ГВП.

Определим одномерное частное ГВП. В общем случае

$$h_k = \frac{1}{\pi} \int \frac{J(a_1, a_2, \dots, a_n)}{c_k - a_i} da_i,$$

где  $J(a_1, a_2, \dots, a_n)$  — обрабатываемый многомерный сигнал;  $a_i$  — переменная интегрирования,  $i = 1, \dots, n$ .

Составим оператор  $HWT(c) = (h_1, \dots, h_n)$ , который и был использован для синтеза регулярных итерационных алгоритмов:

$$c[k] = c[k-1] - \gamma[k] HWT(c[k-1]), \quad (1)$$

где  $\gamma$  — коэффициент;  $k$  — номер итерации.

Сравнение данного поискового метода с градиентными методами показывает преимущество в скорости сходимости разработанного метода при больших масштабах ГВП и близкие результаты при малых масштабах [5]. Эксперименты показали уменьшение количества итераций в 5—10 раз по сравнению с классическими градиентными методами. Кроме того, методы итерационного поиска экстремумов функции на базе ГВП менее чувствительны к локальным экстремумам, особенно это ощутимо при больших значениях масштаба ГВП.

Проведено исследование зависимости точности определения экстремума и скорости сходимости от отношения сигнал/помеха [5]. При отношении сигнал/помеха в диапазоне 5—10 погрешность нахождения положения экстремума не превышала 4% при масштабах ГВП более 32, при отношении сигнал/помеха более 10 погрешность нахождения положения экстремума не превышала 2% при масштабах ГВП не менее 4. Ни один из градиентных методов не достигает таких результатов, поскольку введение в целевую функцию аддитивного гауссовского шума делает градиентные методы неработоспособными уже при отношениях сигнал/помеха менее 15 (по мощности).

Применение разработанного итеративного метода (1) при поиске характерных фрагментов с использованием гиперболического вейвлет-преобразования позволило производить поиск объектов заданного геометрического размера, резко уменьшить количество итераций при целевых функциях типа "овраг", увеличить помехоустойчивость поисковых алгоритмов, создавать алгоритмы поиска глобального оптимума, регулировать детализацию объектов поиска.

Для поиска характерных фрагментов предлагается использовать двухмерный пространственный алгоритм:

$$HWT(x, y) = \frac{1}{\pi} \iint \frac{J(x_1, y_1)}{(\alpha x - x_1)(\alpha y - y_1)} dx_1 dy_1,$$

где  $\alpha$  — масштабный коэффициент;  $x, y$  — пространственные координаты;  $J(x, y)$  — интенсивность изображения.

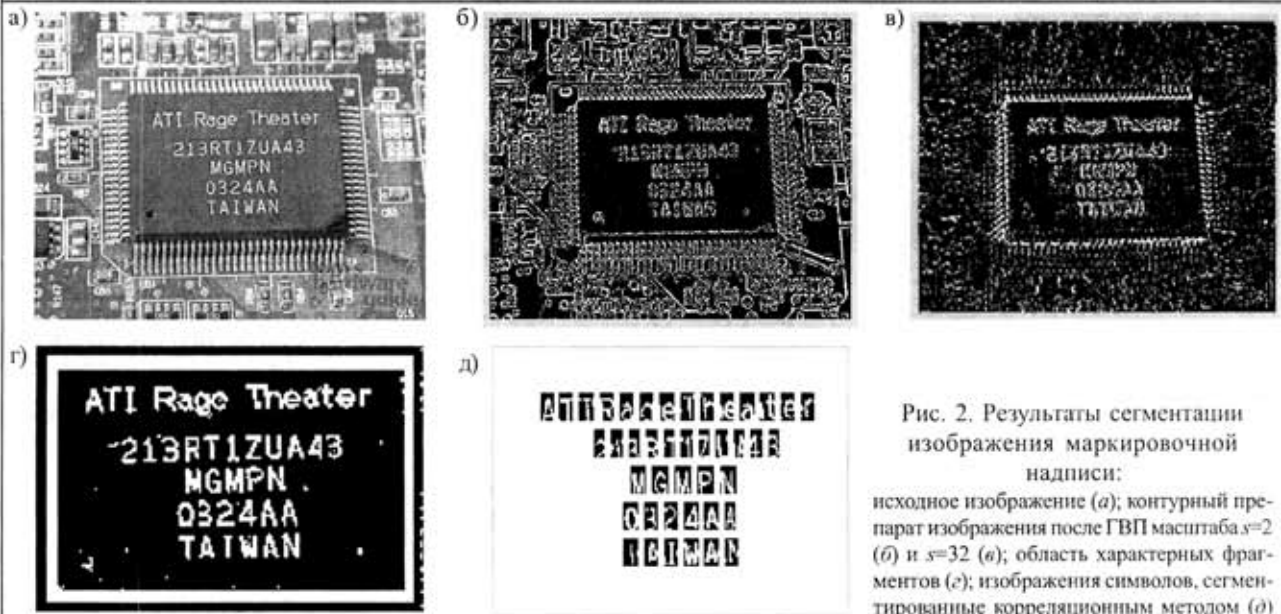


Рис. 2. Результаты сегментации изображения маркировочной надписи:

исходное изображение (а); контурный препарат изображения после ГВП масштаба  $s=2$  (б) и  $s=32$  (в); область характерных фрагментов (г); изображения символов, сегментированные корреляционным методом (д)

Результаты обработки при поиске характерного фрагмента при разных масштабах ГВП представлены на рис. 2, б и в. Как видно, при малых масштабах ( $s=2$ ) на полученном изображении (рис. 2, б) проявляется множество мелких деталей, затрудняющих анализ. С ростом масштаба ( $s=32$ ) на изображении проявляются крупные фрагменты (контурные линии микросхемы) при ослаблении мелких (рис. 2, в).

Бинаризация характерной области производилась в пространстве ГВП пороговым методом [3, с. 127—128]. Результаты бинаризации представлены на рис. 2, г.

Для сегментации бинаризованного изображения маркировочной надписи на отдельные символы в условиях помех обычно применяют корреляционные методы. При корреляционном методе осуществляется плоскопараллельное смещение маски по обрабатываемому изображению и подсчет совпадающих пикселей [6]. Корреляционная функция определяется следующим образом:

$$K(x, y) = \sum_{i=1}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} B(x+i, y+j) \cdot M(i, j),$$

где  $L_x, L_y$  — размер маски по горизонтали и вертикали;  
 $x, y$  — координаты обрабатываемой точки изображения  $B$ ;  
 $i, j$  — координаты пикселей внутри маски  $M$ .

Для бинаризованных изображений расчет корреляционной функции можно проводить по формуле

$$K(x, y) = \sum_{i,j \in M} \delta(i, j),$$

где  $\delta(i, j) = \begin{cases} 1, & B(x+i, y+j) = M(i, j); \\ 0, & B(x+i, y+j) \neq M(i, j). \end{cases}$

Взаимное положение маски и символа, для которого количество таких пикселей максимально, принимается соответствующим реальному положению распознаваемого символа. Для повышения вычислительной эффективности при подсчете совпадающих пикселей используется итерационная процедура [6].

Выбор размеров маски проводился адаптивными методами. Как критерий качества адаптации используется коэффициент заполнения анализируемого сегмента. Под коэффициентом заполнения понимается отношение количества значащих пикселей к общему количеству пикселей внутри сегмента. Для повышения разрешающей способности метода учитывались межсимвольные интервалы. Изменение длины и ширины сегмента, соответствующего каждому символу, производится до тех пор, пока коэффициент заполнения превышает пороговое значение. Из-за действия помех размеры сегментов внутри одной надписи могут существенно отличаться друг от друга. Поэтому после вычисления всех размеров определяются наиболее вероятные значения высоты и ширины символов, для чего используют медианные значения их вариационных рядов [6].

Алгоритм сегментации изображения состоит из следующих этапов:

- подсчет количества совпадающих пикселей внутри скользящей маски;
- нахождение локальных максимумов, превышающих порог, определяемый количеством значащих пикселей в символе минимального размера — единице;
- адаптация размеров маски к конкретному символу по критерию максимума коэффициента заполнения с целью уточнения его размеров и положения в окрестностях локальных максимумов;
- составление вариационных рядов по высоте и ширине сегментов; по медианным значениям вариационных рядов определяются нормализованные размеры сегментов;
- символы вписываются в нормализованный сегмент по критерию максимального количества значащих пикселей в сегменте.

В результате действия алгоритма получается набор нормализованных сегментов, в которые вписаны символы или локальные флюктуации помех (рис. 2, з).

Для распознавания символов применялись нейросетевые методы [7].

\*\*\*

При использовании разработанных технологий была достигнута вероятность правильного распознавания символов 0,99 при вероятности ошибки второго рода не более 0,005. Таким образом, разработанная информационная технология отвечает всем требованиям систем автоматизированного оптического контроля маркировочных надписей компонентов печатных узлов. Технология может быть рекомендована к применению в широком круге задач обработки и распознавания изображений.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Рувина Э. Автоматизированный оптический контроль печатных узлов // Электроника: Наука. Технология. Бизнес.— 2002.— № 6.— С. 26—32.

2. Крылов В. Н., Максимов М. В. Вторичные преобразователи сигналов изображений.— Одесса: Астропринт, 1997.  
 3. Крылов В. Н., Антошук С. Г. Регулярные итеративные методы оптимизации и адаптации на базе преобразования Гильберта // Мат-ли міжнар. конф. з управління "Автоматика-2001". Т. 1.— Одеса: ОНПУ, 2001.— С. 79—80.  
 4. Антошук С. Г., Крылов В. Н. Обработка изображений в области гиперболического вейвлет-преобразования // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы.— 2003.— № 2.— С. 7—10.  
 5. Антошук С. Г., Кlich Ю. А., Николенко А. А., Бабилунга О. В. Метод решения задачи оптимизации в условиях помех // Праці міжнар. конф. «Питання оптимізації обчислень (ПОО-XXXII)».— Київ: Ін-т кібернетики ім. В. М. Глушкова, 2005.— С. 25—26.  
 6. Крылов В. Н., Антошук С. Г. Методы помехоустойчивой сегментации бинаризованных изображений // Тр. Одес. политехн. ун-та.— 2004.— Вып. 1.— С. 164—167.  
 7. Крутлов В. В., Дли М. И., Голунов Р. Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети.— М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2001.

К. т. н. С. Э. СЕМЁНОВА, д. т. н. Э. И. СЕМЁНОВ

Россия, Рыбинская гос. авиацион. технологич. академия им. П. А. Соловьева  
 E-mail: a\_s\_ist@list.ru

Дата поступления в редакцию  
 13.07 2005 г.

Оппонент В. Г. ЮРЬЕВ  
 (ЦКБ "Ритм", г. Черновцы)

## СИСТЕМА ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СКОРОСТИ ТРАВЛЕНИЯ ТОНКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

*Компьютерная система может быть использована для измерения скорости травления, толщины и момента окончания травления диэлектрических пленок при различных методах травления.*

Определение скорости травления тонкопленочного покрытия является достаточно актуальным, т. к. позволяет получить информацию о качестве (структуре, плотности) пленок и сделать заключение о возможности их дальнейшего использования, а также определить момент окончания травления. Для решения этой задачи использована методика, применяемая для контроля скорости осаждения диэлектрических пленок [1], которая заключается в анализе фотометрического сигнала с целью извлечения из него информации о скорости травления и толщине пленки. Фотометрический сигнал изменяется по периодическому закону, близкому к косинусоидальному. Подсчет количества экстремумов позволяет получить информацию о толщине пленки, а вычисление мгновенного значения периода этого сигнала в любой момент времени — информацию о текущей скорости нанесения или травления диэлектрической пленки.

Вычисление мгновенного значения периода фотометрического сигнала осуществляется поочередным использованием методов двойного дифференцирования и временных интервалов в зависимости от участков данного сигнала. В области экстремумов использу-

ется метод двойного дифференцирования, а на участках линейного изменения отражения — метод временных интервалов. Такая комбинация методов позволяет минимизировать до допустимого уровня методическую погрешность изменения мгновенной скорости нанесения (травления) диэлектрической пленки.

В настоящем сообщении предложена разработанная компьютерная фотометрическая система, которая может быть использована для измерения скорости травления, толщины и момента окончания травления диэлектрических пленок при различных методах травления.

Для измерения скорости травления фоторезиста использовался комплекс, приведенный на рис. 1, при этом образец погружался в стеклянную кювету с раствором проявителя (гидрата окиси калия).

В качестве образца использовалась кремниевая пластина с нанесенным на нее путем центрифугирования фоторезистом ФП-9120-1, проэкспонированная ультрафиолетовым излучением.

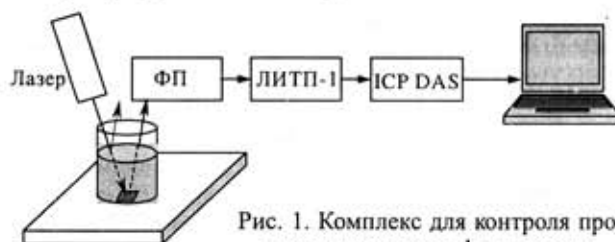


Рис. 1. Комплекс для контроля процесса травления фоторезиста

В системе использован кремниевый солнечный элемент ФКД-5, играющий роль фотоприемника (ФП). Элемент подключен к входу автоматического лазерного измерителя толщины пленок (ЛИТП) [2].

В качестве АЦП использованы модули фирмы ICP DAS серии I-7000. Каждый модуль является функционально законченным устройством, выполняемым в малогабаритном корпусе (рис. 2). На корпусе расположены разъемы и клеммные соединители для винтовой фиксации. Установка модулей не требует специальных корзин или объединительных плат и осуществляется как на стандартную несущую 35-миллиметровую DIN-рейку, так и на любую плоскую панель (стену).



Рис. 2. Модули ICP DAS серии I-7000

Все модули семейства I-7000 имеют встроенный стабилизированный преобразователь напряжения от 10 до 30 В, а также защиту от короткого замыкания и изоляцию входных и выходных сигналов, что обеспечивает им повышенную защищенность. Соединение модулей между собой осуществляется с помощью последовательного интерфейса RS-485. Модули имеют ряд преимуществ: невысокую стоимость, малые габариты и отсутствие специальных коммутационных корзин для объединения модулей.

Программа для обработки сигнала, поступающего от ICP DAS в компьютер через порт COM1, разработана в программной среде Delphi 5.0. Это позволяет организовать запуск обработчика сигнала непосредственно в среде Windows, при этом нет необходимости в установке дополнительных программ (Pascal, Delphi и др.). Частота опроса порта в диапазоне от 1 до 10 Гц задается пользователем перед началом эксперимента.

Фотоприемник ориентирован так, чтобы принимать только луч, отраженный от поверхности пластины. Отражение от поверхности проявителя не используется.

По мере растворения нанесенной пленки коэффициент отражения пленки с подложкой должен меняться по такому же периодическому закону, как и при нанесении пленки (рис. 3) [3, с. 141].

Измеряющая программа компьютерной системы может работать в двух режимах — в тестовом и основном. Тестовый режим используется при настройке и калибровке прибора для конкретных материалов, при этом на экран компьютера выводится информация только о коэффициенте отражения подложки с пленкой. Основной режим позволяет получить наглядное представление о текущих значениях коэффи-

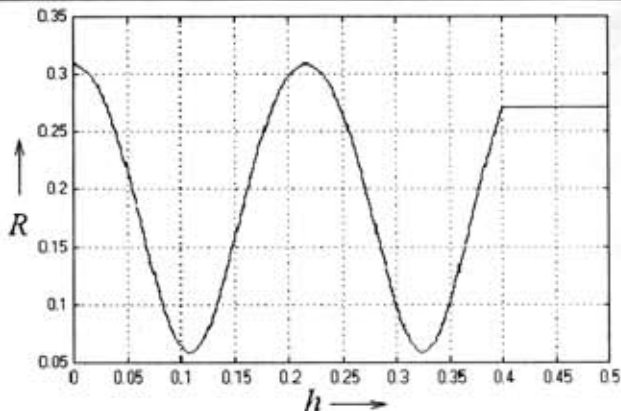


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения подложки с пленкой  $R$  от толщины пленки  $h$

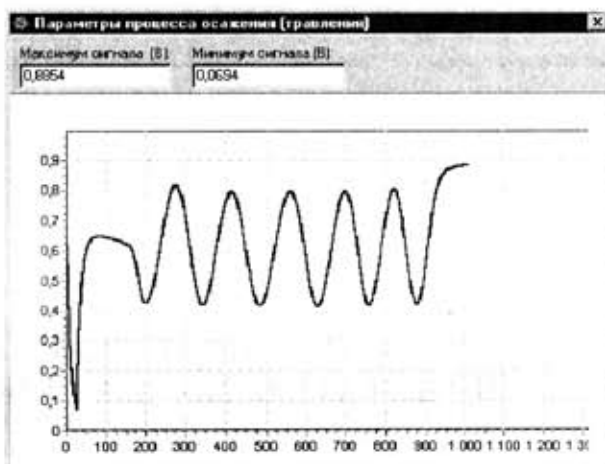


Рис. 4. Работа компьютерного фотометрического измерителя при травлении фоторезистора в тестовом режиме

циента отражения, стравливаемой толщины пленки и скорости травления.

Форма сигнала, полученного в ходе эксперимента (рис. 4), полностью соответствует ожидаемой (см. рис. 3). Первое резкое снижение сигнала фотометра (т. е. коэффициента отражения системы "подложка—пленка") соответствует моменту залива в кювету растворителя. После этого значение сигнала возрастает, и можно наблюдать первый максимум, который по форме значительно отличается от всех последующих, что, возможно, объясняется наличием на поверхности фоторезиста сильно заполимеризованного слоя. Последнее значение сигнала фотометра, близкое к 0,9 В, соответствует отражению чистой подложки. Меняя концентрацию раствора, можно изменять и скорость травления, а следовательно, увеличивать и уменьшать период сигнала фотометрического измерителя.

Из рис. 4 можно заметить, что период сигнала уменьшается, т. е. скорость травления должна возрастать. В этом можно убедиться, запустив программу измерения в основном режиме.

На рис. 5 приведен экспериментальный график, из которого видно, что при травлении фоторезиста скорость травления (толстая линия) действительно несколько возрастает, что также оказывает влияние и на вид графика толщины (тонкая линия), которая теряет четкую линейную зависимость. Средняя скорость трав-

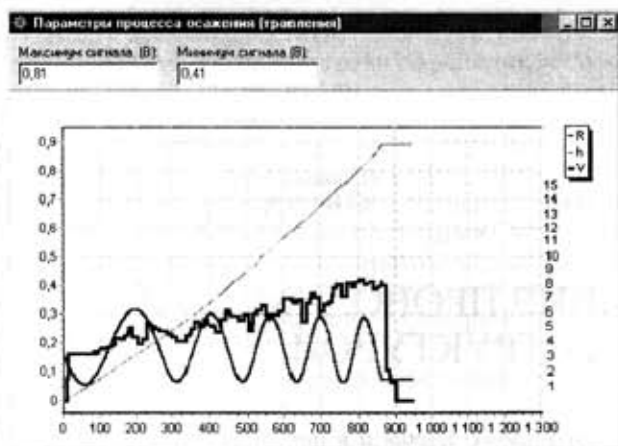


Рис. 5. Работа программного фотометрического измерителя при травлении фоторезиста в основном режиме ления равна 0,3 по приведенной шкале, что в действительности соответствует скорости процесса 6,8 нм/с. (Чтобы видеть реальные данные на экране, необходимо откалибровать систему по шкале скоростей, подобрав коэффициент пропорциональности для скорости травления.)

Толщина стравленной пленки составляет порядка 0,9 мкм. Это значение совпадает с величиной, полученной расчетным путем по методике VAMFO (наблюдение отражения под различными углами) с помощью прибора, описанного в [4]. Так как концентрация проявителя в воде очень мала (0,3%), то при этих расчетах в качестве показателя преломления среды использова-

ли значение показателя преломления воды, равное 1,333 [5, с. 104]. Показатель преломления кремниевой пластины считаем равным 3,5, показатель преломления фоторезиста, измеренный по методу Абеlesa [3, с. 154—158] с помощью упомянутого выше прибора, равен 1,7.

\*\*\*

Таким образом разработана компьютерная фотометрическая система, которая может быть использована для измерения скорости травления, толщины и момента окончания травления диэлектрических пленок при различных методах травления. Система экспериментально проверена при проявлении (травлении) фоторезиста ФП-9120-1 (ТУ 6-36-00210134-121-0—96).

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

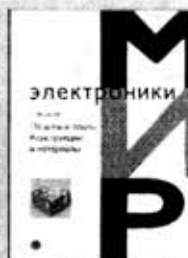
1. Семенова С. Э., Юдин В. В., Семенов Э. И. Математические методы измерения скорости осаждения диэлектрических пленок / Тонкие пленки в электронике. Тезисы XI Междунар. науч.-техн. конф.— Йошкар-Ола: МарГТУ, 2000.— С. 36.
2. Семенов Э. И. Методы контроля технологического процесса термовакuumного нанесения защитных покрытий и тонких пленок и их параметров // Контроль. Диагностика.— 1999.— № 3.— С. 17—24.
3. Физика тонких пленок. Т. 2. / Под ред. Г. Хасса и Р. Э. Туна.— М.: Мир, 1968.
4. Черняев В. Н., Обичкин Ю. Г., Семенов Э. И. Прибор для измерения показателя преломления тонких диэлектрических пленок // Оптико-механическая промышленность.— 1975.— № 12.— С. 38—40.
5. Краткий справочник физико-химических величин / Под ред. К. П. Мищенко и А. А. Равделя.— Л.: Химия, 1972.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

**Медведев А. Печатные платы. Конструкции и материалы.— М.: Техносфера, 2005.— 304 с.**

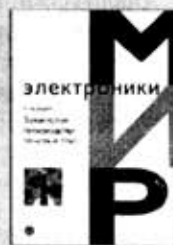
В книге известного российского специалиста описаны схемы процессов, технологические операции, материалы, принципы тестирования и технологического обеспечения надежности межсоединений. Она предназначена для технологов, специализирующихся в производстве печатных плат. Полезна она будет и для конструкторов, 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 колледжей могут рекомендовать ее в качестве учебного пособия по курсу "Конструирование и технология производства электронной аппаратуры".



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

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

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



Д. ф.-м. н. В. В. НОВИКОВ, Е. А. НЕЖЕВЕНКО

Украина, Одесский национальный политехнический университет  
E-mail: novikov@te.net.uaДата поступления в редакцию  
20.09 2005 г.Оппонент д. ф.-м. н. З. Д. КОВАЛЮК  
(ЧО Ин-та проблем материаловедения,  
г. Черновцы)КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОВОДИМОСТИ  
КОМПОЗИТОВ С ХАОТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

*Предлагается схема вычисления эффективной проводимости композита с хаотической структурой на основе модели перколяционной решетки.*

Прогресс в радиоэлектронике связан с использованием новых материалов, таких как наполненные полимеры, стеклокерамика и другие. В радиоэлектронной аппаратуре находят широкое применение наполненные полимерные материалы, в том числе и электропроводящие композиты (клеи, цементы, пасты, эмали, эластомеры и пластмассы). Токопроводящие клеи, цементы, пасты используют при электрическом монтаже для получения внутренних соединений в схемах, для восстановления проводящих участков печатных схем, для крепления активных элементов в гибридных схемах, для радиочастотного экранирования [1].

По сравнению с металлическими проводниками электропроводящие композиты обладают такими преимуществами как высокая коррозионная стойкость, легкая обрабатываемость при изготовлении изделий сложной формы, эластичность и гибкость, возможность эксплуатации при многократных деформациях, доступность и невысокая стоимость по сравнению с металлическими проводниками, возможность получения анизотропных структур.

Твердые и эластичные изделия из токопроводящих композитов также находят применение в качестве нагревательных элементов, в качестве заземляющих элементов, в виде гибких экранов, обеспечивают безопасное термостатирование аппаратов и приборов.

Задача прогнозирования свойств токопроводящих композитов до настоящего времени не нашла своего адекватного решения. В нашей работе на основе компьютерного моделирования исследована проводимость композита с хаотической структурой.

Анализ физических свойств микронеоднородных сред (МНС) с хаотической структурой невозможно обеспечить методами статистической физики [2], поэтому для описания структуры МНС применяют методы фрактальной геометрии и теории перколяции [3]. (Термин «перколяция» в переводе с английского обозначает просачивание, протекание; впервые был употреблен в 1957 г. Бродбентом и Хаммерсли [4].)

Фракталы являются хорошей геометрической моделью структуры МНС. Слово «фрактал» образовано

от латинского fractus и в переводе означает *состоящий из фрагментов*. Термин «фрактал» был предложен Б. Мандельбротом в 1975 г. для обозначения нерегулярных, самоподобных структур [5, 6]. Самоподобие является одним из основных признаков фракталов. В самом простом случае небольшая часть фрактала содержит информацию о всем фрактале. В этом случае для описания среды вводятся макроскопические величины, зависящие от масштаба усреднения, что и позволяет избежать сложного и не всегда применимого статистического описания. Применение простых моделей образования и иерархического роста фрактального множества с подходящими фрактальными размерностями позволяет получить количественное описание различных свойств конкретных неоднородных сред с хаотической структурой.

**Модель структуры композита**

В качестве модели структуры МНС будем рассматривать композит, который состоит из частиц двух типов — черных и белых, при этом будем иметь два вида связей: черную, соединяющую две черных частицы, и белую — во всех остальных случаях (рис. 1).

Согласно рис. 1 получим трехмерную (плоскую в двухмерном случае) прямоугольную решетку, состоящую из узлов и связей (рис. 2). Будем считать черные связи проводящими и имеющими одинаковое сопротивление  $R$ .

Число всех связей  $k=2mn+m-n$ , где  $m$  — число связей вдоль одного ребра по направлению протекания;  $n$  — число связей вдоль одного ребра, перпендикулярного направлению протекания.

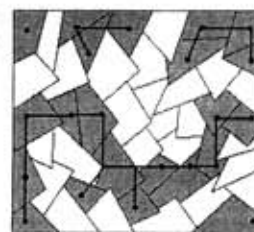


Рис. 1. Структура композита

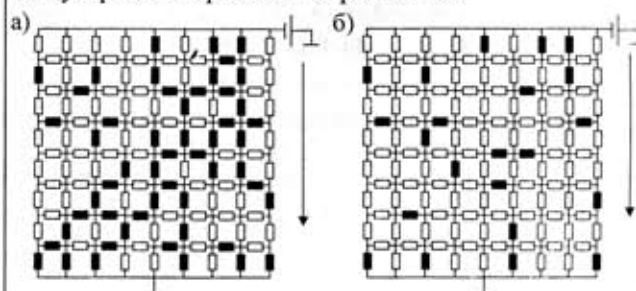


Рис. 2. Конфигурации плоских решеток:

*a* — несвязанное множество черных связей; *b* — связанное множество

В качестве модели МНС исследуем плоскую и пространственную прямоугольную решетку, состоящую из связей, каждая из которых с вероятностью  $p$  принадлежит первому (проводящему — «черному») компоненту. Будем различать два вида конфигураций решеток — содержащую связанное множество (СМ) черных связей (рис. 2, а) или несвязанное множество (НСМ) (рис. 2, б). Для образования СМ черные связи должны соединять две противоположных грани плоской (пространственной) решетки в направлении протекания. Направление протекания показано стрелкой.

В случае объемных решеток число всех связей  $k$  равно

$$k = m(n+1)(l+1) + n(m-1)(l+1) + l(n+1)(m-1) = 3mnl + 2mn + 2ml - 2nl + m - n - l.$$

Здесь  $l$  — число связей вдоль бокового ребра, перпендикулярных направлению протекания.

### Проводимость при случайном распределении черных и белых связей

В связи со сложностью перебора всех конфигураций черных и белых связей, образующих СМ, для решеток больших размерностей при вычислении их проводимости использовался численный метод — метод Монте-Карло, который состоит в моделировании случайного распределения связей. Это распределение повторяется  $N$  раз, независимо от предыдущего, потом производятся необходимые вычисления (рассчитывается проводимость решетки и функция вероятности  $R(p)$ ), затем результаты вычислений усредняются. Для использования этого метода было введено множество  $D$ , которое определяет, сколько черных связей случайным образом будет разбросано на решетке.

Для оценки необходимого количества распределений (разбросов «черных» связей по решетке) при заданной точности вычисления эффективной проводимости воспользуемся формулой [7, с. 89]

$$n = \frac{1}{\frac{\Delta^2}{t^2 v (1-v)} + \frac{1}{N}}, \quad (1)$$

где  $n$  — объем выборки;  
 $\Delta$  — величина допустимой ошибки;  
 $t$  — коэффициент, соответствующий доверительной вероятности;  
 $v$  — доля признака  $X$  в генеральной совокупности;  
 $N$  — объем генеральной совокупности.

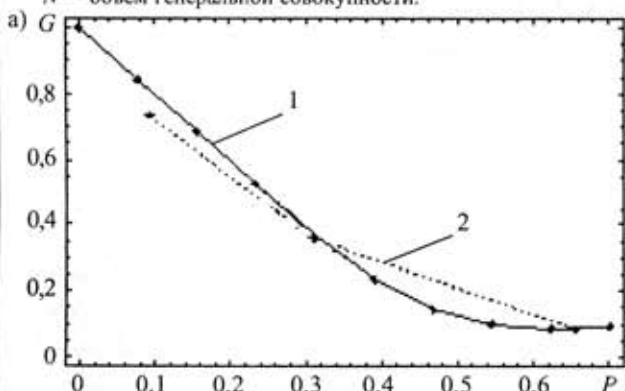


Рис. 4. Сравнение эффективной проводимости при случайном разбросе (1) и при упорядоченном распределении (2), умноженной на  $R(p)$ , для плоской решетки:

а — размерность решетки  $m=8$  и  $n=8$ ,  $\sigma_2=10^{-4}$ ,  $N=10000$ ; б — размерность решетки  $m=8$ ,  $n=8$  и  $l=8$ ,  $\sigma_2=10^{-4}$ ,  $N=100$

Для узлов плоской решетки размерностью  $m \times l$  и трехмерной решетки размерностью  $m \times n \times l$  были составлены уравнения Кирхгофа в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^k \sigma_i (\varphi_i - \varphi_{i-1}) - \sum_{i=1}^k \sigma_i' (\varphi_i - \varphi_{i-1}) = 0, \quad (2)$$

где  $\sigma_i, \sigma_i'$  — проводимость  $i$ -й связи, соответственно входящей в узел  $a_{ij}$  ( $a_{i,jz}$ ) и исходящей из него по направлению протекания;

$\varphi_i$  — потенциал  $i$ -го узла;

$$\sigma_i \sigma_i' = \begin{cases} \sigma_1, & \text{если } i \in D; \\ \sigma_2, & \text{если } i \notin D. \end{cases}$$

Значение множества  $D$  изменяется от 1 (одна черная связь) до числа всех связей  $k$ , так же можно задать шаг изменения значения  $\Delta D$ . Каждое случайное распределение связей проводится  $N$  раз, значение  $N$  задается в зависимости от необходимой точности и скорости вычисления. При образовании СМ черными связями для решетки рассчитывается значение проводимости усредняется для каждого значения множества  $D$  (см. Приложение, табл. 1). Для значений множества  $D$  рассчитывалось также отношение числа проводящих конфигураций к числу всех конфигураций случайного распределения, т. е. функцию  $R(p)$ .

### Результаты расчетов

При расчете эффективной проводимости исследуемой решетки значения проводимости черных связей задавались равными  $\sigma_1=1$ ; для белых связей значения проводимости были равны  $\sigma_2=10^{-4}$ , где  $1 < x < 10$ .

Были проведены вычисления эффективной проводимости решетки  $\sigma$  (рис. 2) и функции вероятности

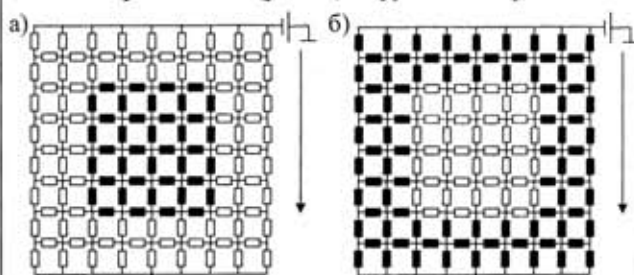
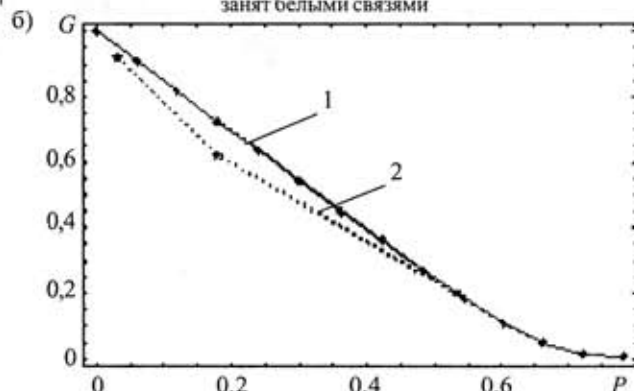


Рис. 3. Конфигурации решеток с распределением связей типа «прямоугольник в прямоугольнике»:

а — центр решетки занят черными связями; б — центр решетки занят белыми связями



$R(p)$ , которая определялась как отношение числа соединяющих множеств из проводящих связей (СМ) к числу всех возможных конфигураций при заданной концентрации проводящих связей  $p$  при их хаотическом распределении на решетке.

Также были рассчитаны эффективные проводимости для решетки с упорядоченным распределением связей в случае, когда в ее центре находились решетки меньших размерностей (рис. 3).

Для каждого значения размерности вложенной решетки из белых связей для решетки с упорядоченным распределением связей (рис. 3, б) было вычислено значение эффективной проводимости всей решетки (см. Приложение табл. 4, 6).

На рис. 4 представлены результаты расчетов эффективной проводимости решеток с хаотическим распределением связей.

Полученные результаты позволяют обосновать следующую схему вычисления эффективной проводимости композитов с хаотической структурой: *проводимость композита, содержащего СМ, со случайным распределением связей равна проводимости композита, содержащего СМ, с упорядоченным распределением связей (типа «прямоугольник в прямоугольнике»), умноженной на вероятность принадлежности черной связи СМ* (табл. 4, 6, рис. 4, 5).

**Выводы**

С помощью компьютерного моделирования была создана модель хаотической (неупорядоченной) структуры композита на трехмерной (плоской в двумерном случае) решетке, имеющей два сорта проводимости связей — «хорошо» проводящие и «слабо» проводящие. С помощью метода Монте-Карло было смоделировано случайное распределение проводящих и слабо проводящих связей и определена вероятность образования перколяционных кластеров (соединяющих множеств) в композите в зависимости от концентрации проводящих связей. Были рассчитаны проводимости решетки при наличии в ней соединяющего мно-

жества, образованного проводящими связями. Также были рассчитаны проводимости для решетки с упорядоченным распределением связей в случае, когда в ее центре находились решетки меньших размерностей, занятые слабо проводящими связями.

Полученные результаты позволили обосновать схему вычисления эффективной проводимости композитов с хаотической структурой.

**Приложение**

**Проводимость.** Расчеты проводились для двухкомпонентного композита с хаотической структурой: проводимость первого компонента  $\sigma_1=1$ , проводимость второго  $\sigma_2=10^{-4}$ . В случае образования черными связями СМ были рассчитаны средние значения эффективной проводимости решетки при переборе всех комбинаций расположения черных и белых связей. Результаты расчетов представлены в табл. 1, 2.

С помощью метода Монте-Карло были рассчитаны эффективные проводимости при случайном распределении черных и белых связей — см. табл. 3 и 4.

**Функция вероятности.** Функция  $R(p_0)$  является суммой вероятности всех вариантов расположения черных и белых связей, образующих СМ, при концентрации черных связей  $p_0$  и может быть записана в виде

$$R(p_0) = \sum_{i=0}^k A_i p^i (1-p)^{k-i}, \tag{3}$$

где  $k$  — число всех связей;

$k = 2mn + m - n$  для плоской решетки;

$k = m(n+1)(l+1) + n(m-1)(l+1) + l(n+1)(m-1)$  для трехмерной решетки;

$m$  — число связей одного ребра вдоль направления протекания;

$n$  — число связей одного ребра, перпендикулярных направлению протекания;

$l$  — число связей бокового ребра, перпендикулярных направлению протекания (для трехмерной решетки);

$i$  — число проводящих связей;

$A_i$  — число возможных конфигураций СМ при заданном  $p$ .

Для вычисления коэффициентов  $A_i$  был проведен перебор всех возможных конфигураций расположения черных и белых связей, образующих СМ. Для расчета была разработана программа в пакете Mathematica.

Таблица 1

Среднее значение эффективной проводимости плоской решетки размерностью  $l_x \times l_y$

Количество черных связей	2x1 k=5	2x2 k=8	2x3 k=11	3x1 k=8	3x2 k=13	3x3 k=18	4x1 k=11	4x2 k=18
1	—	—	—	—	—	—	—	—
2	0,50005	0,3334	0,250075	—	—	—	—	—
3	0,458431	0,313231	0,238196	0,50005	0,3334	0,250075	—	—
4	0,680051	0,331076	0,242259	0,464362	0,315874	0,239672	0,50005	0,3334
5	1	0,450951	0,273485	0,451592	0,30314	0,231293	0,470069	0,318598
6	—	0,618623	0,354335	0,568275	0,301746	0,226476	0,44987	0,305809
7	—	0,808927	0,465774	0,754513	0,319909	0,226931	0,451069	0,296706
8	—	1	0,593586	1	0,3793	0,235706	0,522439	0,292807
9	—	—	0,727887	—	0,47044	0,25759	0,639426	0,296523
10	—	—	0,863876	—	0,58676	0,298605	0,799165	0,312783
11	—	—	1	—	0,719674	0,35762	1	0,349327
12	—	—	—	—	0,860148	0,431774	—	0,405174
13	—	—	—	—	1	0,517255	—	0,47867
14	—	—	—	—	—	0,609946	—	0,567539
15	—	—	—	—	—	0,70638	—	0,668457
16	—	—	—	—	—	0,80425	—	0,777115
17	—	—	—	—	—	0,902303	—	0,888992
18	—	—	—	—	—	1	—	1

Таблица 2

Среднее значение эффективной проводимости трехмерной решетки размерностью  $l_x \times l_y \times l_z$

Количество черных связей	$1 \times 2 \times 1$ $k=12$	$1 \times 2 \times 2$ ( $2 \times 2 \times 1$ ) $k=19$	$1 \times 3 \times 1$ $k=20$
1	—	—	—
2	0,250075	0,16675	—
3	0,236213	0,160063	0,250075
4	0,235981	0,157818	0,238184
5	0,257672	0,16147	0,228416
6	0,32669	0,173853	0,221697
7	0,422039	0,199034	0,219359
8	0,531066	0,240672	0,224111
9	0,646361	0,294779	0,240392
10	0,764428	0,357037	0,273443
11	0,88237	0,424169	0,320791
12	1	0,494069	0,379482
13	—	0,565481	0,44682
14	—	0,637666	0,52031
15	—	0,710186	0,597746
16	—	0,782786	0,677401
17	—	0,855331	0,758079
18	—	0,927743	0,83899
19	—	1	0,919627
20	—	—	1

Таблица 3

Значения эффективной проводимости при случайном распределении связей (размерность решетки  $m=8$  и  $n=8$ ,  $k=128$ ,  $\sigma_2=10^{-4}$ ,  $\Delta D=10$ ,  $N=10000$ )

Количество белых связей	Среднее значение проводимости решетки, содержащей СМ
0	1
10	0,84329
20	0,685342
30	0,525519
40	0,367427
50	0,232992
60	0,142212
70	0,0985342
80	0,0858664
90	0,092491
100	—
110	—
120	—

Таблица 4

Сравнение значений эффективной проводимости плоской решетки при упорядоченном и случайном расположении связей (размерность решетки  $m=8$  и  $n=8$ ,  $\sigma_2=10^{-4}$ ,  $N=10000$ )

Количество белых связей	Эффективная проводимость с упорядоченным расположением связей	Произведение эффективной проводимости с упорядоченным расположением связей и вероятности принадлежности черной связи СМ	Среднее значение эффективной проводимости при случайном разбросе связей (метод Монте-Карло)
12	0,808729	0,732911	0,811255
40	0,517944	0,356087	0,367427
84	0,242525	0,083368	0,0888397

Таблица 5

Значения эффективной проводимости при случайном распределении связей (размерность решетки  $m=8$ ,  $n=8$  и  $l=8$ ,  $k=1656$ ,  $\sigma_2=10^{-4}$ ,  $\Delta D=100$ ,  $N=100$ )

Количество белых связей	Среднее значение проводимости решетки, содержащей СМ
0	1
100	0,907578
200	0,817105
300	0,723133
400	0,635942
500	0,543597
600	0,449394
700	0,361803
800	0,369559
900	0,186014
1000	0,108669
1100	0,0490675
1200	0,0145448
1300	0,00833295

Таблица 6

Сравнение значений эффективной проводимости плоской решетки при упорядоченном и случайном расположении связей (размерность решетки  $m=8$ ,  $n=8$  и  $l=8$ ,  $\sigma_2=10^{-4}$ ,  $N=100$ )

Количество белых связей	Значение эффективной проводимости с упорядоченным расположением связей	Произведение эффективной проводимости с упорядоченным расположением связей и вероятности принадлежности черной связи СМ	Среднее значение эффективной проводимости при случайном разбросе связей (метод Монте-Карло)
54	0,950715	0,919714	0,951716
300	0,759288	0,621736	0,715934
882	0,42471	0,198506	0,200505

Для трехмерных решеток размерностью  $1 \times 2 \times 1$ ,  $1 \times 2 \times 2$  ( $2 \times 2 \times 1$ ) и  $1 \times 3 \times 1$  были вычислены коэффициенты  $A_i$  для функции  $R(p_0)$ . На основе расчета функции был определен порог протекания  $p_c$ , который является вещественным корнем уравнения  $p_c = R(p_c)$ , лежащим в интервале  $[0..1]$ .

Решетка  $1 \times 2 \times 1$ :

$$R(p) = 4p^2(1-p)^{10} + 48p^3(1-p)^9 + 238p^4(1-p)^8 + 616p^5(1-p)^7 + 856p^6(1-p)^6 + 776p^7(1-p)^5 + 493p^8(1-p)^4 + 220p^9(1-p)^3 + 66p^{10}(1-p)^2 + 12p^{11}(1-p) + p^{12};$$

$$p_c = 0,208463.$$

Решетка  $1 \times 2 \times 2$  ( $2 \times 2 \times 1$ ):

$$R(p) = 6p^2(1-p)^{17} + 116p^3(1-p)^{16} + 1017p^4(1-p)^{15} + 5301p^5(1-p)^{14} + 18077p^6(1-p)^{13} + 42257p^7(1-p)^{12} + 70612p^8(1-p)^{11} + 90186p^9(1-p)^{10} + 91664p^{10}(1-p)^9 + 75414p^{11}(1-p)^8 + 50362p^{12}(1-p)^7 + 27130p^{13}(1-p)^6 + 11628p^{14}(1-p)^5 + 3876p^{15}(1-p)^4 + 969p^{16}(1-p)^3 + 171p^{17}(1-p)^2 + 19p^{18}(1-p) + p^{19};$$

$$p_c = 0,13842.$$

Решетка  $1 \times 3 \times 1$ :

$$R(p) = 4p^3(1-p)^{17} + 84p^4(1-p)^{16} + 816p^5(1-p)^{15} + 4818p^6(1-p)^{14} + 19100p^7(1-p)^{13} + 52822p^8(1-p)^{12} + 102940p^9(1-p)^{11} +$$

$$+ 142578p^{10}(1-p)^{10} + 147528p^{11}(1-p)^9 + 118541p^{12}(1-p)^8 + 75520p^{13}(1-p)^7 + 38376p^{14}(1-p)^6 + 15456p^{15}(1-p)^5 + 4842p^{16}(1-p)^4 + 1140p^{17}(1-p)^3 + 190p^{18}(1-p)^2 + 20p^{19}(1-p) + p^{20};$$

$$p_c = 0,373991.$$

## ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Базарова Ф. Ф. Органические и неорганические полимеры в конструкциях радиоэлектронной аппаратуры.— М.: Сов. радио, 1974 г.
2. Privalko V. P., Novikov V. V. The science of heterogeneous polymers: structure and thermophysical properties.— Chichester—New York—Brisbane—Toronto—Singapore: J. Wiley, 1995.
3. Proceedings of Sixth International Symposium, "Fractals in physics", Trieste.— 1985.— Amsterdam: North-Holland, 1986.
4. Broadbent S. R., Hammersley J. M. Percolation processes // Proc. Camb. Phil. Soc.— 1957.— Vol. 53.— P. 629—641.
5. Mandelbrot B. B. Fractals, form, chance and dimension.— San Francisco: Freeman and Co., 1977.
6. Mandelbrot B. B. The fractal geometry of nature.— New York: Freeman and Co., 1983.
7. Кокрен У. Методы выборочного исследования.— М.: Мир, 1976.

Е. Л. ЖАВЖАРОВ, д. ф.-м. н. В. М. МАТЮШИН

Украина, Запорожский национальный технический университет  
E-mail: jin@zntu.edu.ua

Дата поступления в редакцию  
19.09 2005 г.

Оппонент к. т. н. В. Е. КУТНИЙ  
(ХФТИ, г. Харьков)

## НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ МОДИФИКАЦИЯ МЕДНЫХ ПЛЕНОК ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ АТОМАРНОГО ВОДОРОДА

*Показана возможность низкотемпературной модификации в среде атомарного водорода свойств медных пленок, являющихся основой для создания медной металлизации.*

Достаточно важным на сегодняшний день вопросом микроэлектроники и электроники вообще является вопрос надежности и качества металлических пленок — как для нанесения металлизации в виде токопроводящих дорожек внутри интегральных схем (ИС), так и при производстве печатных плат. На качество и надежность металлических пленок, используемых для металлизации, влияют такие параметры пленки как адгезия, геометрия, определяющая электрические параметры пленки, структура пленки и ее однородность.

Тенденция развития микроэлектроники к микроминиатюризации привела к увеличению плотности упаковки ИС, а значит и к уменьшению геометрии пассивных элементов ИС — металлизации. Необходимость высокого быстродействия, стабильности, малых размеров привела к тому, что на смену достаточно технологичной алюминиевой металлизации пришла медная металлизация. Так, проводимость меди в два раза выше, чем у алюминия, и почти в 3 раза выше, чем у вольфрама, к тому же электромиграционные свойства меди в десять раз лучше, чем у алюминия.

Однако медь нельзя наносить таким же способом, как и алюминий. Во-первых, применение медной металлизации требует применения барьерного подслоя, к которому адгезия меди невысока, во-вторых, геометрические размеры медной металлизации меньше, что в совокупности формирует особые требования к технологии нанесения медной пленки. Для улучшения адгезионных свойств пленок используются многослойная металлизация [1] или последующая обработка слоя металлизации в активной среде для улучшения ее свойств [2].

Одним из перспективных направлений, позволяющих проводить целенаправленное изменение свойств поверхности, является воздействие на нее активных газовых частиц, в частности атомарного водорода. Поверхность, будучи центром рекомбинации атомарного водорода в молекулярный, оказывается под воздействием выделяемой при этом энергии (4,48 эВ на 1 акт рекомбинации) [4]. Известно, что такое взаимодействие будет сопровождаться рядом эффектов — диффузией атомов пленки в подложку [4], распылением атомов пленки [5], химической реакцией [6] и т. д. На основании вышеизложенного представляется возможной модификация структурных свойств пленок под воздействием атомарного водорода.

Цель данной работы — на примере системы "медь—кремний" выявить возможное изменение структурных свойств пленок меди под воздействием атомарного

атомарного водорода, изучить процессы взаимодействия атомарного водорода с тонкими металлическими пленками, нанесенными на полупроводниковую подложку.

Исследовались структуры "медь—кремний". Для изготовления структур использовался *n*-кремний с удельным сопротивлением  $\rho=10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  и плотностью дислокаций  $10^2 \text{ см}^{-2}$ . Химически полируемая поверхность кристаллов кремния была покрыта слоем природного окисла. Кремний подвергался очистке путем обезжиривания в  $\text{CCl}_4$  с последующей промывкой в деионизированной воде.

Пленка меди наносилась на кристаллы кремния путем термического испарения в вакууме при нагревании подложки до температуры  $100^\circ\text{C}$ . Толщина пленки составляла примерно  $1 \text{ мкм}$ . Как известно, медь при повышенных температурах и контакте с кислородом достаточно быстро окисляется с образованием визуально наблюдаемых цветных пятен окиси. Пленки меди подвергались окислению путем контакта нагретых структур с воздухом. Структура пленки наблюдалась через микроскоп БИОЛАМ-М.

Атомарный водород образовывался путем диссоциации молекулярного водорода в плазме, образованной высокочастотным разрядом. Молекулярный водород выделялся из раствора  $\text{KOH}$  (20%) в дистиллированной воде путем электролиза при плотности тока  $0,01 \text{ А/см}^2$ . Далее водород пропусклся через форбаллон для улавливания капель  $\text{KOH}$ , осушительный столбик, заполненный силикагелем, и поступал в рабочую камеру. Концентрация атомов водорода измерялась калориметрическим способом и составляла около  $10^{19} \text{ м}^{-3}$  при давлении в рабочей камере  $20 \text{ Па}$ .

Исследуемые структуры помещались на расстоянии  $25 \text{ см}$  от области разряда, что позволило исключить попадание заряженных частиц из плазмы [7]. Время влияния атомарного водорода на структуры при температуре  $300\text{—}500 \text{ К}$  варьировалось от 2 до 20 мин. Через микроскоп БИОЛАМ-М проводился визуальный контроль изменения поверхности окисленной пленки меди в процессе ее обработки атомарным водородом. Изменения фиксировались путем фотографирования поверхности образца через микроскоп.

Также проводилась оценка изменения величины адгезии медных пленок после обработки структуры в среде атомарного водорода. Посредством быстросохнущего клея на основе цианакрилата создавалось клеевое соединение металлического стержня диаметром  $0,5 \text{ мм}$  с поверхностью образца, после чего измерялось усилие отрыва такой системы. Место отрыва стержня фотографировалось через микроскоп.

Исследования показали, что атомарный водород — чрезвычайно активная газовая среда, которая приводит к разным эффектам на поверхности исследуемых структур. Уже после 2 мин обработки структур в среде атомарного водорода интенсивно начинают протекать процессы очистки поверхности кристалла и восстановления окисной пленки меди. Этот процесс наблюдается визуально: темные цветные пятна окиси на поверхности пленки исчезают и уже через 10 мин обработки поверхность получает яркий желтый оттенок, характерный для чистой полированной меди.

Фотографии одного и того же места на поверхности структуры, а именно — границы раздела "медь—поверхность кристалла", сделанные до обработки в среде атомарного водорода (рис. 1, а) и после обработки структуры в течение разного времени  $t$  (рис. 1, б—д), демонстрируют процессы, протекающие на поверхности пленки. Как видно из фотографий, в течение первых 5—10 мин происходит удаление окисной пленки путем ее восстановления или распыления. Для данного кристалла процесс восстановления достаточно интенсивно протекает уже через 5 мин обработки, а после 20 мин окислительный слой практически полностью исчезает.

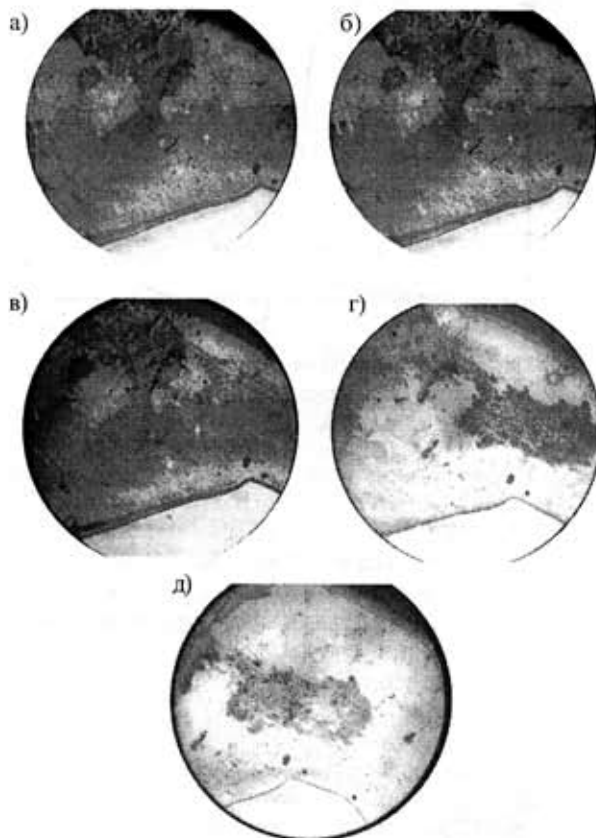


Рис. 1. Процесс восстановления пленки  $\text{Cu}$  под воздействием атомарного водорода:

а —  $t=0 \text{ мин}$ ; б —  $t=3 \text{ мин}$ ; в —  $t=5 \text{ мин}$ ; г —  $t=10 \text{ мин}$ ; д —  $t=20 \text{ мин}$

При исследовании зависимости усилия разрыва клеевого соединения (металлического стержня с пленкой меди) от времени обработки выяснилось, что разрыв соединения может происходить по различным путям (типичное место отрыва представлено на рис. 2). Анализ снимков исследования показал, что процесс отрыва протекал по следующим направлениям:



Рис. 2. Типичное место разрыва клеевого соединения: 1 —  $\text{Cu}$ ; 2 —  $\text{Si}$ ; 3 — остатки клея

1. Отрыв пленки меди от кристалла, характеризующий адгезию  $\text{Cu}$  к кристаллу (видимая площадь на фото — площадь кремния  $S_{\text{Si}}$ ).

2. Разрыв или расслоение пленки меди, характеризующее когезионные свойства пленки (видимая часть пленки меди в месте отрыва —  $S_{Cu}$ ).

3. Отрыв клея, характеризующий адгезионные свойства клея (видимые остатки клея на рисунке —  $S_{кл}$ ).

Чтобы более точно и наглядно зафиксировать процессы изменения свойств пленки от времени обработки ее атомарным водородом, был построен график временной зависимости площади отрыва для каждой из компонент ( $S_{Si}$ ,  $S_{Cu}$ ,  $S_{кл}$ ), по которым происходил отрыв (рис. 3).

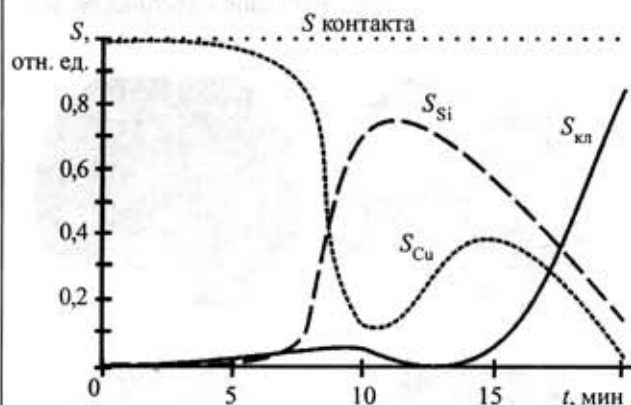


Рис. 3. Изменение характера отрыва от времени обработки атомарным водородом

Как видно из графика, на начальном этапе исследования (время обработки  $t < 10$  мин) разрыв соединения происходит в основном за счет расслоения пленки меди. Далее возникает отрыв пленки от кремния, но с увеличением времени обработки структуры площадь разрыва по компонентам Cu—Cu и Cu—Si( $SiO_2$ ) стремится к нулю, а сам разрыв происходит преимущественно за счет клея. То есть самым слабым компонентом на момент обработки около 20 мин является сам клей.

На рис. 4 представлена усредненная для серии кристаллов зависимость усилия отрыва от времени обработки структуры в среде атомарного водорода. Как видно из графика, обработка пленки в среде атомарного водорода приводит к увеличению усилия отрыва.

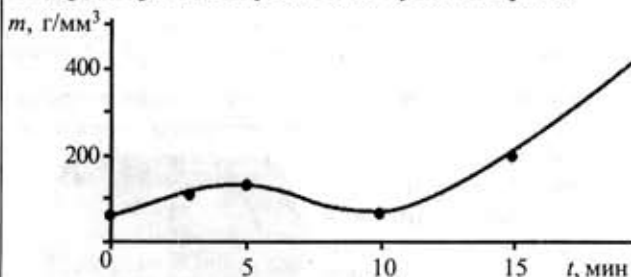
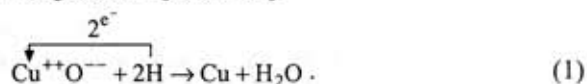


Рис. 4. Зависимость усилия отрыва металлического стержня от времени обработки структуры в среде атомарного водорода

При соотношении графиков, представленных на рис. 3 и 4, можно сказать, что с увеличением времени обработки в среде атомарного водорода происходит увеличение усилия отрыва, что связывается с увеличением адгезии пленки к кристаллу, а также с увеличением когезионных свойств пленки. Так, при об-

работке пленки более 15 мин разрыв соединения происходит в основном за счет разрыва соединения "клей—металлический стержень". Следует отметить, что на кривой рис. 4 наблюдается участок спада усилия на отрыв, соответствующий обработке структуры в течение 10 мин. Очевидно, в процессе воздействия атомарного водорода на пленку меди протекают несколько конкурирующих процессов. То есть кроме процесса восстановления пленки, что наблюдается визуально, происходит еще процесс уплотнения пленки, уменьшения ее пористости, процесс улучшения адгезии пленки к кристаллу, что следует из графика, но также и процесс, уменьшающий усилие отрыва.

Для объяснения зафиксированного явления можно предложить качественную модель взаимодействия атомарного водорода с медной пленкой. Пленка меди (сама медная пленка и окисный слой) до взаимодействия с атомарным водородом достаточно пористая. При отрыве происходит разрыв и расслоение окисного слоя пленки, при этом усилие на отрыв, приведенное на единицу площади отрыва, составляет приблизительно  $86 \text{ г/мм}^2$ . Обработка образцов в среде атомарного водорода приводит к увеличению усилия отрыва более чем в 4 раза (см. рис. 4). При этом увеличение усилия на отрыв на начальном этапе можно связать с восстановлением окисной пленки согласно реакции [8, с. 203]:



Кроме процесса восстановления еще протекает процесс диссипации энергии рекомбинации атомов водорода на поверхности пленки, приводящий к уплотнению пленки, а значит и к увеличению адгезии и когезии пленки. Так, при проведении эксперимента был зафиксирован разогрев кристаллов до температуры порядка  $60^\circ\text{C}$ .

Одновременно с отмеченными процессами протекает процесс, приводящий к уменьшению усилия отрыва. Очевидно, таким процессом может быть процесс диффузии водорода в объем меди, а также к границе раздела "медь—полупроводник". Согласно [9, с. 233], водород растворяется в большинстве металлов, занимая при этом междоузлие в решетке кристалла. При этом растворение водорода вызывает расширение решетки металла. Каждый внедренный примесный атом водорода вызывает сдвиг атомов металла из их равновесных положений, а возникающие перекручивания кристаллической решетки приводят к целому ряду изменений физических свойств металлов.

Таким образом, уменьшение усилия отрыва можно связать с наличием водорода в медной пленке. Очевидно, что с увеличением длительности влияния атомарного водорода на структуры преобладающими можно считать процессы восстановления, согласно (1), а также процессы, сопровождающие диссипацию энергии рекомбинации атомов водорода. Это приводит к переносу частиц и протеканию процессов упорядочения/разупорядочения структуры медной пленки, что сопровождается в общем случае увеличением когезионных и адгезионных свойств пленки меди (рис. 4,  $t > 15$  мин).

## Выводы

Атомарный водород — весьма активная газовая среда, приводящая к протеканию целого ряда процессов на поверхности твердого тела, в том числе пленок. При проведении экспериментальных исследований выявлены особенности взаимодействия атомарного водорода с тонкими пленками меди.

Показано, что пленка меди, достаточно пористая и имеющая слой окисла в начале эксперимента, под воздействием атомарного водорода претерпевает очистку и восстановление окисного слоя согласно химической реакции (1).

Диссипация энергии рекомбинации атомарного водорода в молекулярный приводит к небольшому разогреву кристалла (температура зависит от подложки, на которой лежит кристалл). При этом инициируется протекание процессов упорядочения/разупорядочения структуры медной пленки, сопровождаемое увеличением когезионных и адгезионных свойств пленки меди. Так, обработка свыше 15 мин приводит к увеличению усилия отрыва примерно в 5 раз.

Процессом, конкурирующим с процессами улучшения адгезионных и когезионных свойств пленок меди, можно считать процесс наводороживания пленки. Однако при обработке структуры свыше 15 мин преобладающими можно считать процессы, улучшающие когезионные и адгезионные свойства пленок меди.

Таким образом, показана возможность низкотемпературной модификации в среде атомарного водорода свойств медных пленок, являющихся основой для создания медной металлизации.

## ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Pat. 6423201 USA. Method of improving the adhesion of copper / Mandrekar Tushar.— 23.07 2002.
2. Pat. 6171661 USA. Deposition of copper with increased adhesion / Zheng Bo, Chen Ling, Mak Alfred, Chang Mei.— 09.01 2001.
3. Лавренко В. А. Рекомбинация атомов водорода на поверхности твердых тел.— К.: Наукова думка, 1973.
4. Matyushin V. M., Martynyuk R. V. Influence of defect generation on low-temperature diffusion on Au in Ge under the influence of atomic hydrogen // Functional materials.— 2001.— Vol. 8, N 2.— P. 401—403.
5. Матюшин В. М. Вплив атомарного водню на процеси маспереносу з тонких металевих плівок в системах з обмеженою розчинністю / Автореф. дис. ... докт. фіз.-мат. наук.— Харківський Фізико-технічний інститут.— 2004.
6. Матюшин В. М. Низкотемпературная диффузия индия в германии, стимулированная атомарным водородом // ФТП.— 2001.— Т. 35, вып. 3.— С. 301—304.
7. Волькенштейн Ф. Ф., Горбань А. Н., Соколов В. А. Радиалорекомбинационная люминесценция полупроводников.— М.: Наука, 1976.
8. Глинка Н. Л. Общая химия.— Л.: Химия, 1982.
9. Водород в металлах. Т. 1 // Под ред. Г. Алефельда, И. Фелькеля.— М.: Мир, 1978.

## НОВЫЕ КНИГИ

**Урличич Ю. М., Данилин Н. С., Белослудцев С. А. Многоплановые инженерно-физические исследования электронной компонентной базы для космоса (МИФИ ЭКБ).— М.: МАКСПресс, 2005.— 200 с.**

В монографии впервые в Российской Федерации представлена информация о современных методах и инструментальных средствах физико-технологического анализа космической электронной компонентной базы.

Материалы отражают мировой уровень космической индустрии и получены в результате выполнения совместных проектов РосКосмоса (ФГУП «Российский НИИ космического приборостроения») и Европейского космического агентства в течение 1993—2005 гг., включая программы Европейского сообщества (ЕС) — Тасис (Taxis), фирм Великобритании — IGG, Spur, Испании — Tecnologica и Германии — Astrium.

Материал монографии будет полезен для разработчиков и испытателей аппаратуры космического приборостроения, аспирантов ВУЗов данного профиля, сотрудников ракетно-космической индустрии.



**Смольский С. М., Филиппов А. И. Три шага к профессии: наука, диссертация, педагогика.— Одесса: «Нептун-Технология», 2005.— 128 с.: ил. 4, табл. 1.**

Цена 3\$ (без стоимости доставки)

Авторы работы показывают, что выполнение любого научного исследования, подготовку научных статей, отчетов и написание диссертации следует производить в определенной логической последовательности действий, которую можно назвать алгоритмом научного исследования. При этом указывается не только то, что следует сделать, но и как, какими средствами. Авторы указывают пути приобретения мастерства и в педагогической деятельности, реализующейся на грани знаний и искусства.

Книга предназначена, в основном, для молодых исследователей, соискателей ученых степеней магистра и кандидата наук и начинающих педагогов вузов.

Справки по e-mail: tkea@odessa.net и по тел. (048) 728-18-50.



И. В. ДОКТОРОВИЧ, д. ф.-м. н. И. М. ФОДЧУК, В. К. БУТЕНКО,  
д. т. н. В. Н. ГОДОВАНЮК, к. т. н. В. В. РЮХТИН, В. Г. ЮРЬЕВ

Украина, г. Черновцы, ЦКБ «Ритм», Черновицкий нац. университет  
им. Юрия Фельдковича  
E-mail: rhythm@chv.ukrpack.net

Дата поступления в редакцию  
06.10 2005 г.  
Оппонент д. т. н. В. В. ДАНИЛОВ  
(ДонНУ, г. Донецк)

## ВЛИЯНИЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ПОТОКА ИЗЛУЧЕНИЯ РТУТНЫХ ЛАМП НА КАЛИБРОВКУ ПРИБОРОВ

*Приведена методика учета нестабильности потока излучения газоразрядных ртутных ламп, позволяющая уменьшить погрешность калибровки УФ-радиометров с  $\pm 10,2$  до  $\pm 8,5\%$ .*

Требование по уровню нестабильности потока излучения при измерениях фотоэлектрических параметров фотоприемников (ФЭП ФП) является первоочередным требованием, которое устанавливается в различного уровня нормативно-технической документации. Например, в стандарте, который определяет методы измерений ФЭП ФП [1], нестабильность потока излучения не должна выходить за пределы  $\pm 2\%$ .

Часто эти пределы оказываются недопустимо большой величиной. Так, при измерениях параметров и характеристик фотоприемников или оптико-электронных приборов, предназначенных для метрологических целей, нестабильность их чувствительности не должна превышать  $\pm 1\%$ . В этих случаях либо подбирают стабильный источник излучения (излучатель с блоком питания), либо вводят опорный канал (его еще называют контрольным каналом или каналом сравнения [2]), и если процесс изменения потока излучения во времени слабозаметен и монотонно меняется ( $0,2$ — $0,5\%$ /мин), эта нестабильность легко фиксируется и учитывается при измерениях.

Однако в метрологии используются и источники с высокой кратковременной нестабильностью. К ним относятся газоразрядные ртутные лампы [3, с. 95—97], которые широко используются при калибровке оптико-электронных приборов, для проверки спектральных приборов типа МДР-2, -3, -23, КСВУ-6, -23 и т. п., для определения коэффициентов пропускания светофильтров, нестабильности чувствительности ФП при воздействии УФ-излучения, для измерений ФЭП ФП, чувствительных в УФ-диапазоне, и т. д.

Если учесть, что измерения параметров и характеристик разнесены во времени (например калибровка энергетического потока ( $\Phi$ ) или освещенности ( $E_s$ ) с помощью контрольного фотодиода проводится в одно время, а передача сигнала в оптико-электронный прибор — через некоторое время), то влияние нестабильности потока излучения такого источника ( $\delta_p$ ) существенно скажется на общей погрешности измерений. Поэтому вопрос нестабильности УФ-излучения и методики учета ее во время измерений является первоочередным.

В настоящей работе определялись кратковременная нестабильность интегрального по спектральному составу потока излучения ( $\delta_k$ ) и нестабильность спектрального распределения потока излучения ( $\delta_\lambda$ ) ртутных ламп типа ДРТ-220. Измерения нестабильности  $\delta_k$  производилось на протяжении времени  $t_1=2,5$  мин — времени, при котором возникает погрешность при считывании фотосигналов и их обработке; нестабильность  $\delta_\lambda$  определялась на протяжении десяти минут ( $t_2=10$  мин) — времени, за которое вносится погрешность при переносе единицы оптического потока излучения прибору, который калибруется.

Для устранения влияния на результаты исследований нестабильности чувствительности контрольных ФП они предварительно были отобраны и их величина нестабильности не превышала  $\pm 0,3\%$ .

Первая составляющая нестабильности — кратковременная нестабильность  $\delta_k$  — определялась для интегрального по спектральному составу потока излучения ртутной лампы, т. к. в качестве фотоприемника опорного канала используется высокостабильная фотометрическая головка (ГФ), которая чувствительна в видимом диапазоне — в относительно широком спектральном диапазоне. (Необходимо сказать, что термином «интегральный поток» авторы называют поток, который дают линии ртути в видимом диапазоне.)

Измерения  $\delta_k$  проводились на линейном участке энергетической характеристики чувствительности ГФ с интервалом пятнадцать секунд между измерениями при напряжении питания лампы  $U_{\text{раб}}=220$  В.

На рис. 1 приведены результаты измерений. Как видим, величина нестабильности  $\delta_k$  изменяется во времени произвольно (не монотонно), и амплитуда  $\delta_k$  может превышать 3%.

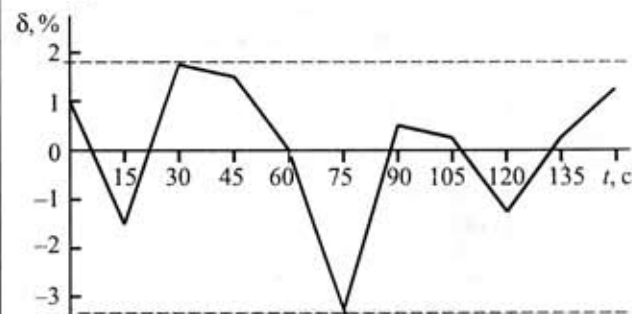


Рис. 1. Кратковременная нестабильность потока излучения ртутной лампы относительно его среднего значения

Согласно [4, 5] в УФ-диапазоне энергетические потоки или освещенность нормируются, а соответственно, и измеряются в поддиапазонах 0,22—0,28 мкм (поддиапазон УФ-С, или просто С), 0,28—0,32 мкм (поддиапазон УФ-В, или В) и 0,32—0,40 мкм (поддиапазон УФ-А, или А). Поэтому вторая составляющая нестабильности — нестабильность спектрального состава потока излучения  $\delta_\lambda$  — определялась в поддиапазонах А, В и С. Для выделения поддиапазонов использовались отобранные по нестабильности чувствительности фотодиоды на основе фосфида галлия [6] и полосовые светофильтры.

Для питания лампы использован блок, который включается в сеть 220 В переменного тока. Поскольку при изменении напряжения питания (в пределах  $\pm 10\%$ ) изменяется температурный режим лампы, а соответственно, изменяется давление паров ртути в колбе лампы (что в свою очередь приводит к изменению спектрального перераспределения потока излучения), то в дальнейших исследованиях определялась нестабильность спектрального состава потока излучения  $\delta_\lambda$  при напряжениях питания лампы  $U_{-10\%}=198$  В (ток лампы  $I_{л1}=2$  А),  $U_{ном}=220$  В ( $I_{л2}=2,6$  А) и  $U_{+10\%}=242$  В ( $I_{л3}=3$  А).

Измерения проводились на установке, структурная схема которой приведена на рис. 2. Фотометрическая головка использовалась в качестве фотоприемника опорного канала как фотоприемника с высокостабильной чувствительностью.

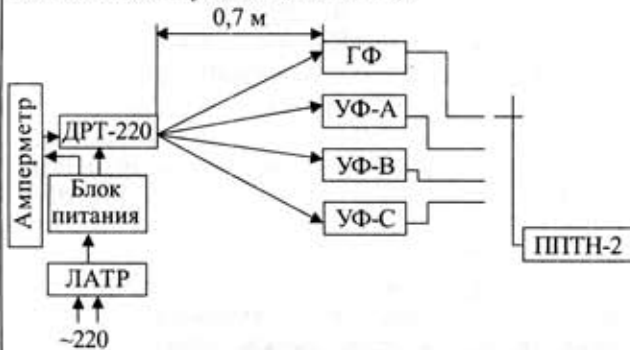


Рис. 2. Структурная схема установки для измерения нестабильности спектрального распределения потока излучения ртутной лампы ДРТ-220 (ЛАТР — трансформатор, ППТН-2 — преобразователь «ток—напряжение»)

Через 30 мин после выхода лампы на рабочий режим при заданом токе последовательно, с шагом в две минуты, было проведено измерение фотосигналов на выходе фотометрической и радиометрических головок, определены средние их значения и относительные отклонения величин фотосигналов от их среднего значения при каждом измерении [7; 8, с. 12—36]. Так как для эксперимента были отобраны стабильные фотоприемники, то относительное изменение фотосигналов характеризует нестабильность потоков излучения.

Результаты расчетов отклонения величин фотосигналов от их среднего значения при каждом измерении приведены в табл. 1. Как видно из данных таблицы, характер изменения потоков излучения в момент измерений сохраняется, т. е. нестабильность в каждом из диапазонов не меняет знак отклонения.

Таблица 1

Отклонения величин фотосигналов от их среднего значения, %

Номер измерения	$U_{раб} = 198$ В				$U_{раб} = 220$ В				$U_{раб} = 242$ В			
	ГФ	А	В	С	ГФ	А	В	С	ГФ	А	В	С
1	+4,2	+4,5	+4,3	+3,1	+0,1	+1,0	+1,6	+2,2	-2,1	-1,6	-1,5	-1,5
2	-5,0	-5,2	-4,3	-3,9	+1,5	+1,0	+1,6	+2,6	+1,4	+2,4	+2,5	+1,2
3	-5,0	-4,5	-5,0	-5,5	+1,5	+1,7	+1,5	+3,2	+2,1	+2,1	+1,9	+2,3
4	+4,2	+4,5	+4,3	+5,5	-3,1	-2,6	-2,8	-2,2	-1,0	-1,6	-1,5	-1,5
5	+1,5	+0,7	+0,7	+0,8	-0,1	-0,2	-1,0	-1,0	-1,4	-1,6	-1,5	-1,0

Таблица 2

Средние значения (А) и относительные изменения (%) фототоков

$U_{раб}$ , В	ГФ	УФ-А	УФ-В	УФ-С
198	$7,6 \cdot 10^{-6}$ А $\pm 5,0\%$	$6,7 \cdot 10^{-6}$ А $\pm 5,2\%$	$1,4 \cdot 10^{-6}$ А $\pm 5,0\%$	$1,3 \cdot 10^{-6}$ А $\pm 5,5\%$
220	$13 \cdot 10^{-6}$ А $\pm 3,1\%$	$12 \cdot 10^{-6}$ А $\pm 2,6\%$	$2,5 \cdot 10^{-6}$ А $\pm 2,8\%$	$2,3 \cdot 10^{-6}$ А $\pm 3,2\%$
242	$14 \cdot 10^{-6}$ А $\pm 2,1\%$	$13 \cdot 10^{-6}$ А $\pm 2,4\%$	$2,7 \cdot 10^{-6}$ А $\pm 2,5\%$	$2,6 \cdot 10^{-6}$ А $\pm 2,3\%$

Однако ее значения отличаются по величине. Кроме того, нестабильность потока излучения растет, если напряжение питания меньше номинального.

В табл. 2 приведены результаты определения средних значений фотосигналов и максимальные величины относительного отклонения фототоков.

Сравнивая результаты определения нестабильности потоков излучения ртутной лампы, приведенные на рис. 1 и в табл. 2, видим, что кратковременная нестабильность потока излучения  $\delta_k$  и нестабильность в спектральных поддиапазонах  $\delta_\lambda$  при номинальном напряжении питания ( $U_{ном}=220$  В) суть величины одного уровня.

Как было показано выше (см. табл. 1), во всех измеряемых спектральных диапазонах изменение потоков излучения в момент измерения имеет одинаковый знак, но потоки меняются по-разному. Для оценки уровня этой разницы были определены коэффициенты отличия  $K_i$  в спектральных диапазонах УФ-А, УФ-В и УФ-С:

$$K_{Ai} = \frac{I_{Ai}}{I_{ГФi}}; K_{Bi} = \frac{I_{Bi}}{I_{ГФi}}; K_{Ci} = \frac{I_{Ci}}{I_{ГФi}}, \quad (1)$$

где  $K_{Ai}, K_{Bi}, K_{Ci}$  — коэффициенты отличия в спектральных диапазонах А, В и С, отн. ед.;

$I_{ГФi}, I_{Ai}, I_{Bi}, I_{Ci}$  — фототоки соответственно фотометрической и радиометрических головок, А;

$i$  — порядковый номер измерения.

Результаты определения коэффициентов приведены в табл. 3.

Если в момент определения энергетической освещенности (пусть это будут измерения под номером 1) коэффициент отличия в спектральном диапазоне А при  $U_{раб}=220$  В был равен  $K_{A1}=0,880$ , то и в момент ка-

Таблица 3  
Коэффициенты отличия в спектральных диапазонах

i	U <sub>раб</sub> = 198 В			U <sub>раб</sub> = 220 В			U <sub>раб</sub> = 242 В		
	K <sub>А1</sub>	K <sub>В1</sub>	K <sub>С1</sub>	K <sub>А1</sub>	K <sub>В1</sub>	K <sub>С1</sub>	K <sub>А1</sub>	K <sub>В1</sub>	K <sub>С1</sub>
1	0,886	0,184	0,166	0,880	0,189	0,171	0,879	0,187	0,179
2	0,882	0,185	0,169	0,867	0,186	0,176	0,884	0,188	0,178
3	0,889	0,183	0,167	0,874	0,185	0,177	0,871	0,185	0,179
4	0,886	0,184	0,170	0,876	0,186	0,176	0,867	0,184	0,177
5	0,878	0,185	0,166	0,872	0,184	0,176	0,873	0,185	0,180
K <sub>ср</sub>	0,884	0,183	0,168	0,874	0,186	0,175	0,875	0,186	0,178

Таблица 4  
Средние значения и относительное изменение коэффициентов отличия, %

U <sub>раб</sub> , В	K <sub>А1</sub>	K <sub>В1</sub>	K <sub>С1</sub>
198	0,884 ± 0,7 %	0,183 ± 0,5 %	0,168 ± 1,2 %
220	0,874 ± 0,8 %	0,186 ± 1,6 %	0,175 ± 2,0 %
242	0,875 ± 0,9 %	0,186 ± 1,1 %	0,178 ± 1,1 %

либровки (пусть это будут измерения под номером 3) коэффициент отличия в этом же диапазоне А, но при U<sub>раб</sub>=198 В, должен быть равен K<sub>А3</sub>=0,880. На самом деле коэффициент равен 0,889, т. е. разница составляет 1%.

В табл. 4 приведены результаты определения средних значений коэффициентов отличия и их максимальные величины относительного отклонения. При сопоставлении очевидно, что относительное изменение коэффициентов отличия (табл. 4) значительно меньше относительного изменения фототоков (см. табл. 2).

Ниже приведена методика учета нестабильности потока излучения на основе контроля этого изменения с помощью фотоприемника опорного канала. Структурная схема измерительной установки приведена на рис. 3.

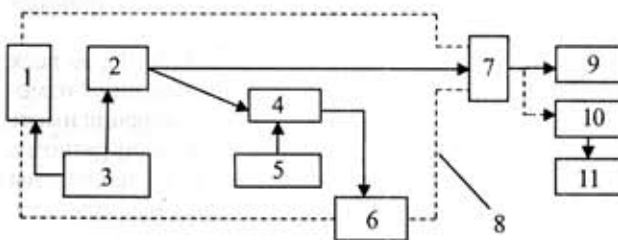


Рис. 3. Структурная схема измерительной установки: 1 — вентилятор; 2 — источник УФ-излучения — лампа ДРТ220; 3 — блок питания источника УФ-излучения; 4 — фотоприемник опорного канала; 5 — блок питания опорного канала; 6 — вольтметр измерительного блока опорного канала; 7 — интерференционные светофильтры; 8 — корпус осветителя; 9 — УФ-радиометр; 10 — эталонная радиометрическая головка (ЭРГ) — контрольный фотоприемник ФД-288; 11 — преобразователь «ток — напряжение» ППТН-2

Энергетическая освещенность E<sub>ε</sub> определяется по формуле

$$E_{\epsilon} = \frac{I_{\kappa}}{S_{\lambda\kappa} A_{\kappa}}, \quad (2)$$

где фототок контрольного фотоприемника, А;  
I<sub>κ</sub> — чувствительность контрольного фотоприемника в измеряемом спектральном диапазоне, А/Вт;  
S<sub>λκ</sub> — площадь фоточувствительного элемента контрольного фотоприемника, м<sup>2</sup>.

Одновременно с измерениями фототока на выходе контрольного фотоприемника (I<sub>κ</sub>) необходимо провести измерения фототока с фотоприемника опорного канала (I<sub>ο</sub>) и определить по формуле (1) коэффициент отклонения K.

Вместо контрольного фотоприемника устанавливается исследуемый УФ-радиометр и производится его калибровка. Если в момент калибровки УФ-радиометра фототок фотоприемника опорного канала (I<sub>ο1</sub>) отличается от I<sub>ο</sub>, необходимо пересчитать величину энергетической освещенности E<sub>ε1</sub> по формуле (3) и произвести калибровку радиометра с уточненным значением освещенности:

$$E_{\epsilon 1} = E_{\epsilon} K I_{\epsilon 1}. \quad (3)$$

Основная относительная погрешность калибровки (δ<sub>ε</sub>) [7] будет равна

$$\delta_{\epsilon} = 1,1 \sqrt{\delta_{\text{гр}}^2 + \delta_s^2 + \delta_i^2 + \delta_c^2 + \delta_o^2}, \quad (4)$$

где δ<sub>гр</sub> — погрешность эталонной радиометрической головки, ±7%;  
δ<sub>s</sub> — нелинейность чувствительности ЭРГ, ±1%;  
δ<sub>i</sub> — нестабильность чувствительности ЭРГ, ±1%;  
δ<sub>c</sub> — относительное изменение коэффициента отклонения, ±2%;  
δ<sub>ο</sub> — погрешность определения фототока опорного канала, ±2%.

Подставив значения, получим величину погрешности δ<sub>ε</sub>=±8,5%. Если учитывать относительное изменение фототоков (±5,5%), эта величина будет равной ±10,2%, что превышает допустимое значение.

### Выводы

1. В работе впервые определена нестабильность энергетических потоков ртутной лампы в видимом диапазоне и в спектральных поддиапазонах УФ-А, УФ-В и УФ-С и установлено, что нестабильность потоков имеет одинаковый характер во всех диапазонах.

2. Нестабильность потоков излучения ртутных ламп растет при уменьшении напряжения (тока) питания лампы. Для уменьшения нестабильности лампы при использовании ее при калибровке УФ-радиометров необходимо использовать стабилизированные источники питания.

3. Приведена методика учета нестабильности потоков излучения, которая позволяет уменьшить погрешность калибровки УФ-радиометров с ±10,2 до ±8,5% при допустимом значении погрешности ±10,0% [5, с. 19].

4. Так как учесть нестабильность потоков излучения ртутных ламп с погрешностью меньше ±2% не удастся, то не рекомендуется использовать ртутные лампы для измерения нестабильности чувствительности фотоприемников.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. ГОСТ 17772—88. Приемники излучения полупроводниковые. Фотозлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотозлектрических параметров и определения характеристик.

2. Измерение параметров приемников оптического излучения / Под ред. Н. Кубатова, Н. В. Васильченко. — М.: Радио и связь, 1983.

3. Айзенберг Ю. Б. Справочная книга по светотехнике.— М.: Энергоатомиздат, 1983.  
 4. Гигиеническая оценка и методы контроля оптического излучения производственных источников (методические рекомендации).— Киев: Министерство здравоохранения УССР, 1986.  
 5. Санітарні норми та правила устрою, експлуатації та контролю обладнання, яке генерує електромагнітне випромінювання оптичного діапазону (інфрачервоне, видиме, ультрафіолетове).— Київ: АМН України, 1997.

6. Шабашкевич Б. Г., Назаренко Л. А., Годованюк В. М. Дослідження фотоелектричних параметрів фотоприймачів, чутливих в УФ-діапазоні // Український метрологічний журнал.— 2004.— Вип. 1.— С. 33—36.  
 7. ГОСТ 8.207—76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдения. Основные положения.  
 8. Кассандрова О. Н., Лебедев В. В. Обработка результатов наблюдения.— М.: Наука, 1970.

**УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ,  
ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2005 г.**

**БИБЛИОГРАФИЯ**

**Техническая политика**

Перспективы развития тонкопленочных микросборок.  
*В. Г. Спирин* 1  
 Система базовых несущих конструкций радиоэлектронных средств: состояние проблемы. *Ю. С. Романова, К. Ю. Шерин* 2  
 Система сбора и обработки полетной информации. *М. Д. Скубилин, А. В. Письменов, С. Г. Головин, С. Е. Бублей* 2  
 Быстрее, лучше, дешевле (выставка «Электроника-2004», г. Мюнхен). *В. Д. Вернер, А. А. Ковалев, А. А. Резнев, А. Н. Саудов, Ю. А. Чаплыгин* 4  
 Состояние и проблемы развития радиоэлектронной отрасли Украины. *А. В. Демедюк* 5  
 Основные положения государственной программы развития техники и технологий СВЧ на 2005–2009 гг. в Украине. *В. В. Луговский, Ю. Е. Николаенко, А. В. Демедюк, С. Ю. Ларкин* 6

**Электронные средства: исследования, разработки**

Интегрально-оптические волноводные дисперсионные элементы для ВОЛС. *В. Ш. Берикашвили, Н. Т. Ключник, К. Н. Костенко, М. Я. Яковлев* 2  
 Модель сумматора с параллельным выполнением микроопераций. *О. Н. Паулин, Ф. С. Шапо, Н. И. Синегуб* 2  
 Определение коэффициентов конвективного теплообмена в термозлектрических каталитических генераторах. *В. Я. Михайловский, Ю. И. Фединчук* 2  
 Исследование анизотропных оптикотермоэлементов в случае различных оптических и тепловых режимов. *А. А. Ащеулов, И. В. Гуцул* 4  
 Слаботочные диоды Ганна на основе арсенида галлия для КВЧ-аппаратов. *А. Г. Яцуненко, В. М. Ковтонюк, В. Н. Иванов, Ю. Е. Николаенко* 3  
 Схемотехническое моделирование и синтез активных СВЧ-фильтров на полевых транзисторах Шоттки. *Н. А. Филинчук, А. М. Куземко* 3  
 Использование КНИ-транзистора в качестве генератора колебаний напряжения. *Г. К. Нинидзе, С. П. Паелюк, Л. В. Ищук, В. В. Кушниренко* 3  
 Схемное решение построения матричного регистра. *Г. В. Куценко* 3

Активное термостатирование полупроводниковых СВЧ-генераторов. *А. В. Кравченко, С. В. Пляксин, И. И. Соколовский* 3  
 Классификация и синтез полиномиальных кодеров в системах автоматизированной обработки данных. *И. В. Иванова* 4  
 Трендовые статистики при обработке данных в системах технической диагностики. *В. Ф. Миргород, Г. С. Ранченко* 4  
 Анализ методов синдромного декодирования кодов Рида-Соломона. *И. В. Иванова* 5  
 Проблема прочностной надежности в радиоэлектронике. *В. П. Ройзман* 6  
 Алгоритм гибридного декодирования кодов Рида-Соломона без рекуррентных процедур. *И. В. Иванова* 6  
 Универсальная схема управления мощными высоковольтными МОП-инверторами, исключая тиристорный эффект. *Г. И. Гаврилюк, Т. В. Маевская, В. В. Чечель, Н. Н. Шаран* 6

**Техника сверхвысоких частот**

Автодинные ЧМ-локаторы КВЧ-диапазона с непрерывным излучением. *С. М. Смольский, С. Д. Вотропин, Н. Н. Савков, А. А. Плещев, А. А. Трофилев, П. С. Остапенков, А. М. Федотов* 1  
 Экспериментально-расчетная методика определения комплексных проницаемостей ферромагнитных композитов. *Б. А. Демьянчук* 1  
 Усилители мощности Ку-диапазона для наземной станции спутниковой связи. *Б. Н. Севергин, И. В. Яковлев, П. А. Яцык, А. Н. Балаба* 2  
 Микроволновый нагреватель с конвективным теплообменом. *Б. А. Демьянчук* 2  
 Принципиально новый подход к изготовлению СВЧ-элементов и узлов систем связи и навигации. *А. Г. Яцуненко* 5  
 Проектирование биполярных микросхем широкополосных усилителей диапазона 40 МГц. *В. П. Попов, Н. А. Тимошенко, Г. А. Слободянюк, Г. В. Чернецкая* 6

**Системы передачи и обработки сигналов**

Радиодальномер на основе J-корреляционного метода обработки сигнала. *А. Г. Сорочан* 1  
 Оптимизация цифрового фильтра для оценивания фокусировки изображений в цифровой оптической микроскопии. *В. Н. Боровицкий* 2

**Биомедицинская электроника**

Термоэлектрическое устройство для термореконструктивной терапии. Л. Я. Кушнерик, Б. Н. Демчук, А. И. Середюк

Использование электромагнитного излучения в медицине и требования к построению КВЧ-аппаратов. А. Г. Яценко, В. М. Ковтонюк, В. Н. Иванов, Ю. Е. Николаенко

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

**Сенсоэлектроника**

Датчик для измерения криогенных температур на основе нитридных кристаллов Si-Ge. А. А. Дружинин, И. П. Островский, С. М. Матвиенко, Ю. Р. Козут

Исследование возможности создания газоанализатора с транзисторным чувствительным элементом. М. Н. Муршудли, А. М. Алиева, М. И. Мусеев

Двухволновой сенсор дистанционной селекции естественных поверхностей. И. А. Иванченко, Л. М. Будиянская, Ю. Ф. Ваксман

Микроэлектронные термодиодные сенсоры экстремальной электроники. Ю. М. Шварц, М. М. Шварц

Акустозлектронные сенсоры газа со слоистыми структурами. Я. И. Лепих

Экспериментальные исследования датчика давления с пневмомеханическим резонатором. Н. Г. Черняк, А. Н. Бондаренко, Г. А. Скрипковский, В. К. Лопушенко

Дистанционный оптико-электронный датчик с растровой решеткой. И. А. Иванченко, В. И. Сантоний, Л. М. Будиянская

Новое поколение пьезокерамических датчиков физических величин. В. М. Шаратов, М. П. Мусиенко

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

Многофункциональный датчик давления и температуры на основе твердых растворов SiGe. А. А. Дружинин, И. П. Островский, С. М. Матвиенко, А. М. Вуйцук

Диодный сенсор температуры: анализ приборной погрешности измерения. А. Н. Иващенко, Ю. М. Шварц, М. М. Шварц

**Функциональная микро- и нанoeлектроника**

3D слоистые структуры в качестве основы ненакапливаемых катодов и активных элементов фотодиодов. А. Ф. Белянин, М. И. Самойлович, В. Д. Житковский

Оптический аттенуатор. И. В. Докторович, И. М. Фодчук, В. К. Бутенко, В. Н. Годованюк, В. Г. Юрьев

Исследование фотоэлектрических свойств симметричной гетероструктуры "окисел-InSe-окисел". З. Д. Ковалюк, В. Н. Катеринчук, О. Н. Сидор

Исследование пленок поликристаллического кремния для применения в фильтровых спектральных приборах. Н. Г. Джавадов

Влияние термообработки на электрофизические свойства CdZnTe-детекторов  $\gamma$ -излучения. В. Е. Кутный, Д. В. Кутный, А. В. Рыбка, А. С. Абызов, Л. Н. Давыдов, Д. В. Наконечный, И. Н. Шляхов

Блок детектирования гамма-излучения на основе CdZnTe для систем радиационного контроля. В. А. Мокрицкий, О. В. Маслов, Ю. Е. Николаенко, М. В. Максимов

Двухспектральный фотоприемник. Ю. Г. Добровольский, Е. В. Комаров, М. П. Биксей

Применение феррогранатовых эпитаксиальных структур в сверхвысокочастотной электронике. С. И. Ющук, С. А. Юрьев, П. С. Костюк, В. И. Бондар

Емкостные свойства МДП-структур HgCdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. А. В. Войцеховский, С. Н. Несмелов, Н. А. Кульчицкий

Детекторы оптического сигнала на основе структур Au-nSi-Al, Au-nSi. Д. М. Ёдгорова, Э. Н. Якубов

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

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

Микроциповые лазеры с пассивной модуляцией добротности на основе эпитаксиальных структур Nd:AlG/Cr<sup>4+</sup>:AlG. И. И. Ижнин, Н. М. Вакив, А. И. Ижнин, И. М. Сыворотка, С. Б. Узбиский

Интегральные схемы самосканируемых линейных фотоприемников в интроскопии и томографии. В. Л. Перевертайло, А. А. Елифанов, В. Г. Каренгин, Л. И. Тарасенко

**Обеспечение тепловых режимов**

Система водяного охлаждения мощного процессора ПЭВМ. В. Ю. Кравец, В. И. Коньшин, Г. А. Пархоменко

Эффективная система охлаждения квантоскопов. Г. К. Лавренченко, М. Г. Хмельнюк, В. П. Савичев

Теплоотводящая поверхность с пластинчато-прорезным оребрением при низкоскоростном обдуве. Е. Н. Письменный, В. А. Рогачев, А. В. Баранюк, Е. В. Цвященко

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

**Технологические процессы и оборудование**

Конструкторско-технологические варианты коммутационных плат с подложкой из кремния. В. Г. Спириин

Фрезеровально-гравировальные плоттеры для изготовления печатных плат. Е. М. Кудрявцев

Монтаж микросборок с подложкой из кремния. В. Г. Спириин

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

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

Установка электрохимического профилирования для диагностирования эпитаксиальных структур GaAs. *Н. М. Вакив, И. Р. Завербный, Д. М. Заячук, С. И. Круковский, И. О. Мрыхин*

Получение наноструктурированных пленок AlN и ZnO и их применение в электронной технике. *А. Ф. Белянин, М. И. Самойлович, К. А. Ковальский, К. Ю. Петухов*

Технология получения пленок силицида палладия для мощных диодов Шоттки. *Л. П. Ануфриев, В. В. Баранов, Я. А. Соловьев, М. В. Тарасиков*

Аналитические электронные весы с цифроаналоговым каналом компенсации. *А. Ю. Липинский, А. Н. Рудякова, В. Г. Пицюга*

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

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

Влияние  $\gamma$ -облучения на фотоэлектрические параметры InSe-гетероструктур. *З. Д. Ковалюк, В. Н. Катеринчук, О. А. Политанская, О. Н. Сидор*

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

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

СВЧ плазмохимическое осаждение структур для высокоапертурных планарных оптических волноводов. *В. В. Григорьянц, А. П. Долгов, Л. Ю. Кочмарёв, И. П. Шилов*

Плазмохимическое травление эпитаксиальных структур нитрида галлия. *А. Г. Борисенко, Б. П. Полозов, О. А. Федорович, Н. С. Болтовец, В. Н. Иванов, Ю. Н. Свешников*

**Материалы электроники**

Получение и свойства пористого карбида кремния. *Л. А. Светличная, Н. Н. Московченко, П. В. Сербя*

Перспективные материалы для низкоомных толсто-пленочных резистивных элементов. *А. Н. Смирнов, Н. С. Пучкова, Р. Г. Сидорец, В. Д. Лемза*

Условия использования стеклообразных халькогенидных сплавов в дозиметрии высокоэнергетических  $\gamma$ -квантов. *Н. М. Вакив, Р. Я. Головач, А. П. Ковальский, О. И. Шпотюк*

Фотохромная чувствительность модифицированных пленок бактериородопсина для устройств молекулярной электроники. *Г. Е. Адамов, Е. П. Гребенников, А. Г. Девятков*

Формирование гетероструктур GaTe/CdSe для использования в солнечных элементах. *А. А. Балицкий*

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

Влияние режимов ионного легирования и фотонного отжига на параметры имплантированных слоев n-GaAs:Si. *А. Ю. Бончик, И. И. Ижнин, С. Г. Кияк, Г. В. Савицкий*

Температурное поле в кристалле иттрий-алюминиево-граната при двухстадийном выращивании. *Г. П. Ковтун, А. И. Кравченко, А. И. Кондрюк*

Деградационные превращения в топологически разупорядоченных твердых телах: 4. Особенности экспоненциальной кинетики. *В. А. Балицкая, И. М. Брунец, Н. М. Вакив, Г. И. Клым, О. И. Шпотюк*

Способ электродугового восстановления кремния. *О. В. Соловьев, Б. П. Масенко, И. А. Хлопенова*

Исследование воспроизводимости электрофизических параметров толсто-пленочных структур "RuO<sub>2</sub>-стекло". *Ш. Д. Курмашев, Н. Н. Садова, Т. И. Лавренова, Т. Н. Бугаева*

Получение оптически однородных монокристаллов ниобата лития больших размеров. *И. М. Сольский, Д. Ю. Сугак, В. М. Габа*

Зависимость свойств толсто-пленочных терморезисторов от состава базовой шпинели. *И. В. Гадзаман, О. Я. Мруз, О. И. Шпотюк, И. М. Брунец*

Выращивание крупногабаритных монокристаллов вольфрамата кадмия с высокой оптической однородностью. *И. М. Сольский*

Обзор мирового рынка арсенида галлия. *А. В. Наумов*

**Энергетическая электроника**

Исследование термоупругих свойств ветвей термоэлектрических модулей Пельтье. *А. А. Щеулов, О. Н. Маник*

Моделирование термоэлектрической системы генерирования тепловой и электрической энергии. *В. Я. Михайловский, Л. Т. Струтинская, Е. В. Чайковская*

**Стандартизация**

Система стандартизации в Украине. *Л. П. Васильева*

**Библиография**

Указатель статей, опубликованных в журнале в 2004 г.

# РЕКОМЕНДАЦИИ АВТОРАМ ПО ПОДГОТОВКЕ РУКОПИСИ

1. Рукопись должна отличаться подчеркнуто **прикладной направленностью**. Если результаты получены в смежных областях знаний, необходимо показать их применимость в области интересов журнала.

2. При подготовке рукописи нужно учесть, что в редакции она пройдет рецензирование **в следующих аспектах:**

- адресат статьи (категория читателей);
- актуальность темы;
- обоснование постановки задачи;
- новизна информации (в сравнении с работами предшественников);
- бесспорность исходных положений;
- убедительность доказательств;
- правомерность выводов;
- целесообразность (и адекватность тексту) таблиц, иллюстраций, списка использованных источников;
- композиция рукописи, в т. ч. оправданность объема.

3. Название рукописи должно быть конкретным и, в то же время, по возможности кратким.

4. В дополнение к названию приведите мини-аннотацию до 20 слов с информацией, важной для адресата статьи.

5. При необходимости разделите рукопись на разделы. Там, где это возможно, желательно выделить выводы (резюме, заключение). Кстати, **проверьте себя** – насколько согласуются заявленная задача, констатация ее решения в выводах, аннотация статьи, ее мини-аннотация и название.

6. Размерность всех величин, используемых в рукописи, должна отвечать современным требованиям, а использованные символы (как и аббревиатуры) должны быть пояснены по мере их употребления в тексте.

7. При ссылке в тексте на численные значения, формулы и иные **фактические** данные, заимствованные из книг, следует (для удобства поиска) указывать не только саму книгу, но и страницу (например [2, с. 418]).

8. Список «Использованные источники» составляется в последовательности, соответствующей порядку ссылок в тексте. Желательно избегать ссылок на труднодоступные источники (например, на материалы конференций). Источники описываются на языке оригинала. Принятая в журнале полнота описания источников показана на сайте [tkea.wallst.ru](http://tkea.wallst.ru).

9. Сопроводите рукопись текстом библиографической карточки на русском и ан-

глийском языках с аннотацией до 500 печ. знаков. Укажите ключевые слова, а также индекс рукописи по Универсальной десятичной классификации (УДК).

10. Материалы статьи направляйте по e-mail [tkea@optima.com.ua](mailto:tkea@optima.com.ua) (размер письма не должен превышать 1 Мб). Если Вы направляете рукопись по почте, приложите запись статьи на дискете.

Текст статьи набирается в текстовом редакторе Microsoft Word размером 12, без переносов, с интервалом не менее 1,5. Все слова внутри абзаца разделяются только одним пробелом. Правый край текста выравнивать не обязательно. **Крайне нежелательно** использование редактора Equation **при наборе текста** (он допустим только для набора сложных формул).

Общий объем иллюстраций не должен превышать объем текста. Иллюстрации должны быть представлены **отдельными файлами**. Графики и чертежи следует выполнять **в черно-белом (битовом) режиме**.

Если рисунки выполнялись в программе CorelDraw или Word, то необходимо представить оригинальные файлы, т. е. \*.cdr или \*.doc. Рисунки, созданные в других программных пакетах, необходимо экспортировать в любой из следующих форматов: PCX, JPG, TIF.

В случае когда автор не может обеспечить высокое качество рисунка в машинном виде, допускается его выполнение вручную с дальнейшим сканированием: в битовом режиме с разрешением 300 ppi.

**Желательно представление двух вариантов каждого рисунка: с надписями и выносными линиями; без них.**

При подготовке цветных иллюстраций желательно фотографировать объекты на однотонном фоне. Сканирование фотографий необходимо выполнять с разрешением 300 ppi.

11. Снабдите рукопись публикуемыми сведениями об авторах (фамилия, имя, отчество, ученая степень, место работы), а также сообщите служебные и домашние адреса с указанием почтового индекса, сведения о должностном положении, e-mail, телефоны, телефаксы для связи, даты рождения.

12. Если есть ощущение, что могут возникнуть вопросы охраны государственной тайны, сопроводите статью экспертным заключением о возможности ее публикации в открытой печати.

## Завод телевизионной техники

# «Электрон»



— Разработка и производство оптико-электронных систем командного наведения.  
— Производство, установка и обслуживание комплексных систем теленаблюдения и охраны объектов и территорий, систем контроля санкционированного доступа, противопожарной сигнализации и оповещения, систем технической защиты информации, включая аппаратно-программные.

— Нанесение гальванических (медь, никель, хром, серебро, палладий, сплав О-Ви, анодирование, твердое анодирование, химическое оксидирование алюминия) и лакокрасочных покрытий малыми сериями на детали из стали, меди, алюминия и их сплавов. Мощные очистительные сооружения и свободные производственные площади позволяют по требованию заказчика внедрить любой гальванический процесс.

— Анализ полимерных материалов, черных и цветных металлов и их сплавов, клеев, масел, лаков и эмалей, а также санитарно-гигиенические исследования физических факторов рабочей зоны с целью аттестации рабочих мест — аккредитованной заводской лабораторией.

— Изготовление деталей из цветных и черных металлов любой сложности, в том числе и оснастки (штампы, пресс-формы, приспособления) на обрабатывающем центре МАНО 600С и токарных и фрезерных станках с ЧПУ. Наличие токарных автоматов и механических и гидравлических прессов обеспечивают возможность серийного выпуска продукции.

**Качество работ гарантируется сертификатом ISO 9001:2000**

Украина, 79000, г. Львов, ул. Шевченко, 311

Тел.: +38-0322-91-39-84, 91-37-52, 91-37-54

Факс: +38-0322-91-15-76

E-mail: ztf1@lviv.gu.net

ISO  
9001:2000

Київ

10-13  
КВІТНЯ

Виставковий центр

КІЇВ  
ЕКСПО  
ПЛАЗА

ТИЖДЕНЬ ПРОМИСЛОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

EIA

електроніка  
і промислова  
автоматизація

перша міжнародна виставка

**Знайдіть рішення для свого підприємства!**

Виставка відбудеться одночасно з десятою міжнародною виставкою енергетики, електротехніки та енергозбереження **elcomUkraine 2006**.

Тематичні напрями виставки:

- Електроніка
- Контрольно-вимірювальні прилади і автоматика
- Промислова автоматизація

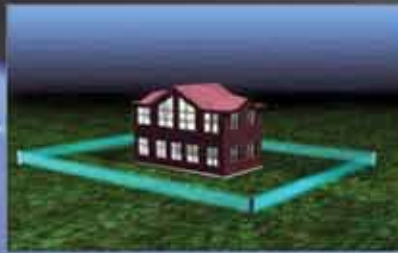
**ЗАПРОШУЄМО ВІДВІДАТИ ВИСТАВКУ!**

Замовлення запрошень, програма виставки на сайті

[www.asutp.euroindex.ua](http://www.asutp.euroindex.ua)

# Радиолучевая охранная система "Электромагнитный забор" ЕМЦ-200

Электромагнитный забор (ЭМЗ) предназначен для обнаружения пересечения нарушителем границ охраняемого объекта



## Характеристики

- рабочая частота
- излучаемая мощность СВЧ-передатчика
- длина участка ЭМ-забора
- ширина зоны срабатывания (толщина ЭМ-забора)
- высота зоны срабатывания
- масса
- размеры приемного и передающего блоков
- потребляемая мощность

10-11 ГГц  
не более 8 мВт  
от 0 до 300 м  
от 0,1 до 1,5 м  
2,0 м  
не более 5 кг  
60x150x300, ..., 2000 мм  
не более 5 Вт

## Отличительные особенности ЕМЦ-200

Отличие всех модификаций ЭМ-забора от аналогов «Барьер-300/500», «Застава», «Застава-М», «FMW-3», «ЛУЧ-м» и др., в том числе и зарубежных аналогов следующее:

1. Существенно меньшая ширина зоны обнаружения и, как следствие, меньшее влияние окружающих предметов на эту зону (приграничную и пограничную). Уменьшение ширины зоны обнаружения соответственно уменьшает зону отчуждения на охраняемом объекте.
2. Более высокая помехозащищенность ЭМ-забора.
3. Полная адаптация к текущей погодной ситуации и к любым ее катаклизмам.
4. Имеет гальваническую развязку цепи питания и линии связи.
5. Имеет защиту входной цепи от импульсных и постоянных перенапряжений, в том числе и от грозных разрядов.
6. ЭМ-забор обладает существенно лучшей технологичностью, в нем используются более доступные материалы и комплектующие, что приводит к уменьшению его стоимости.
7. Гибкость при настройке ЭМ-забора, его улучшенные эксплуатационные характеристики, настраиваемость предельной чувствительности на малые проникаемые через границу предметы (птица, кошки, собаки). Возможен антеннальный вариант ЭМ-забора, позволяющий регистрировать приближение к приемопередающим блокам любых объектов, людей.
8. Обладает возможностью размещения внутри стен и др. предметов. Тем самым обеспечивается камуфляж под окружающие объекты (кирпичные стены, колонны, осветительные приборы и т. д.).
9. Один пункт управления позволяет обслуживать несколько десятков пролетов, сторон периметра ЭМ-забора, индивидуальную их настройку и контроль, а также его пристыковку к персональному компьютеру.
10. Все модификации ЭМ-забора могут включать средства предупреждения приближения к приемным и передающим блокам ЭМ-забора, а также подключаться к видеокамере с видеомонитором, которые включаются только на время прохождения нарушителя через пограничную зону охранной системы.



НПФ Превин ЛТД  
03151, Украина, г. Киев, Воздухофлотский пр-т, 94А  
E-mail: [previn@i.com.ua](mailto:previn@i.com.ua)  
<http://www.previn.kiev.ua>  
Tel/fax: (+38044) 206 46 22



ЭМ-забор запатентован, сертифицирован на Украине

Номер готовили

Алчевск, Донецк, Запорожье, Киев,  
Кишинев, Львов, Москва, Одесса, Рыбинск,  
Санкт-Петербург, Харьков, Черновцы.



Пишите  
Подписывайтесь  
Читайте

1(61) 2006