

ТКЭА

ТЕХНОЛОГИЯ И
КОНСТРУИРОВАНИЕ В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ



2 2004

МАРТ — АПРЕЛЬ



5-я МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

17—21 мая 2004 года
Украина, г. Одесса

- ◆ Сигналопреобразующие технологии
- ◆ Информационные и компьютерные технологии. Моделирование процессов
- ◆ Проектирование, конструирование и производство электронных средств
- ◆ Микро- и наноэлектроника
- ◆ Материалы микро- и наноэлектроники

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

Реквизиты для связи
E-mail <tkea@odessa.net>
тел./факс +38 (048) 733-67-91,
тел. +38 (048) 733-72-83.
Секретарь оргкомитета "СИЭТ-2004"
Тихонова Елена Анатольевна

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



ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

По Украине.

Отделения связи. «Каталог изданий Украины». Индекс 23785.
Подписное агентство «Идея», www.idea.com.ua. Индекс 11146.
тел./факс +038 (062)381-09-32.
Подписное агентство «KSS», www.kss.kiev.ua. Индекс 20363.
тел. +038 (044)464-02-20.

По России.

Отделения связи. Каталог «Пресса России». Индекс 71141.
Представительство журнала «ТКЭА» в России
192286 С.-Петербург, п/о 286, п/я 416; «ЭРА»,
e-mail: era48@mail.ru, тел. (812)595-40-89.

В странах СНГ.

Отделения связи. Подписные каталоги. Индекс 71141.

Через редакцию «ТКЭА».

Украина, 65005, г. Одесса, ул. Прохоровская, 45.
E-mail <tkea@odessa.net>,
тел. (048)733-72-83, тел./факс (048)733-67-91.

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

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

Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.

Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корецкая.

Подписано к печати 22.04.2004 г. Формат 60x84 1/8.

Печать офсетная. Печ. л. 8,0. Уч.-изд. л. 9,9. Тираж 700 экз. Заказ № 54.

Издательство «Нантун-Технология»

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

Отпечатано в типографии издательства «ТЭС»

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

ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Учредитель АО "Нептун"

2004

Год издания 28-й

№ 2

Год регистрации 1992

СОДЕРЖАНИЕ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

К.т.н. Н. М. Вакив
Д.т.н. П. П. Воробиевко
Д.т.н. В. Н. Годованюк
К.т.н. А. А. Дашковский
Д.т.н. Л. С. Лутченков
Д.т.н. В. П. Малахов
В. А. Мингалёв
Д.т.н. В. Б. Ткаченко
Е. А. Тихонова
К.т.н. В. М. Чмиль

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д.т.н. А. Л. Вайнер
К.т.н. Э. Н. Глушеченко
Д.т.н. В. Т. Дейнега
Д.т.н. Ю. А. Долгов
Д.ф.-м.н. В. А. Дроздов
К.т.н. И. Н. Еримичой,
зам. гл. редактора
К.т.н. А. А. Ефименко,
Д.ф.-м.н. Ф. Д. Касимов
К.ф.-м.н. В. В. Ковальчук
Д.ф.-м.н. Г. П. Ковтун
Л. М. Лейдерман,
отв. секретарь редакции
Д.т.н. С. Ю. Лузин
К.т.н. О. Н. Неоденко
К.т.н. Ю. Е. Николаенко
Д.ф.-м.н. В. В. Новиков
К.т.н. В. И. Попов,
гл. редактор
К.т.н. В. В. Рюхтин
К.т.н. В. В. Сибиряков
Д.ф.-м.н. О. И. Шпотьук

АДРЕС РЕДАКЦИИ

Украина, 65005, Одесса-5,
ул. Прохоровская, 45
Тел. (+38-048) 733-72-83
Тел./факс (+38-048) 733-67-91
E-mail: tkea@odessa.net
Web-сайт: tkea.wallst.ru

Международный стандартный
серийный номер
ISSN 0130-6243

Регистрационный номер
КВ 2092 от 07.06.96 г.

Регистрация в ВАК по разделам
"Физико-математические науки",
"Технические науки":

Бюллетень ВАК Украины, 1999, № 4

Проектирование. Конструирование

Оценка электромонтажных параметров коммутационных плат на ранних этапах проектирования РЭС. *Елизаров Б. А., Максимов А. В., Шелест В. И., Ширяев Ю. Н.* 3

Повышение эффективности силового размещения компонентов. *Дмитриев П. И., Зудин С. В., Лузин М. С., Полубасов О. Б.* 7

Изменения низкочастотных шумов в $p-n$ -переходах при низких температурах. *Головка А. Г.* 10

Математические модели сопротивления тонкопленочного резистора с размерами 50 мкм. *Спирин В. Г.* 14

Электронная аппаратура: исследования, разработки

Многофункциональная аппаратура передачи и приема данных 3-501. *Куценко В. Н., Левченко Т. В.* 17

Система линейной телемеханики "Хортица-М" для газопроводов. *Дубец С. В., Федорченко Е. Н., Кузьминов В. И.* 19

Малогобаритный стационарный пирометр с повышенным температурным разрешением. *Ахиезер А. М.* 21

Электроника и экология

Анализ измерительных схем автоматических хемилюминесцентных газоанализаторов оксидов азота и озона. *Михеева И. Л., Куринный В. К., Таякин В. Ю., Мазыра Л. Д.* 24

Система экологического мониторинга состояния воздуха вдоль автомагистралей населенных пунктов. *Девятко Г. А., Лацис С. А., Подольский В. Я., Закрасняный В. В.* 28

Технология производства

Выявление резервов производства методами статистического моделирования по пассивным данным. *Долгов Ю. А.* 30

Микроволновый нагрев: особенности модернизации технологии. *Демьянчук Б. А.* 41

Проблемы ресурсосбережения и экологической безопасности в гальванотехнологии. *Скубилин М. Д., Письменов А. В., Гусев Б. А.* 46

Контроль. Качество. Надежность

Метод оперативного тестирования вычислительных устройств с плавающей точкой. *Дрозд А. В., Копытчук Н. Б., Огинская Е. В.* 52

Закономерности деградации светоизлучающих диодов. *Викулин И. М., Ирха В. И., Коробицын Б. В., Горбачев В. Э.* 55

Сенсор для контроля процессов формирования и набора прочности вяжущих сред. *Зайченко Л. М., Середюк А. И., Фотий В. Д., Шевчук Ю. Ф.* 57

Материалы электроники

Эффекты переключения и памяти в МОП-структурах $Al-SiO_2-Si$. *Искендер-заде З. А., Ахундов М. Р., Джафарова Э. А., Алиханова Ш. А.* 59

Термоэлектрические свойства сплавов системы $TlInTe_2-TlYbTe_2$. *Зарбалиев М. М., Гахраманов Н. Ф., Сардарова Н. С., Гейдарова Г. А.* 62

Библиография

Новые книги 27, 45, 54

В портфеле редакции 20

Выставки. Конференции 2-я стр. обл., 13, 64

ЗМІСТ

Проектування. Конструювання

Оцінка електромонтажних параметрів комутаційних плат на ранніх етапах проектування РЕЗ. *Б. А. Єлізаров, О. В. Максимов, В. І. Шелест, Ю. М. Ширяєв* (3)

Підвищення ефективності силового розміщення компонентів. *П. І. Дмитрієв, С. В. Зудін, М. С. Лузін, О. Б. Полу-басов* (7)

Зміни низькочастотних шумів у $p-n$ -переходах при низьких температурах. *А. Г. Головка* (10)

Математичні моделі опору тонкоплівкового резистора з розмірами 50 мкм. *В. Г. Спірін* (14)

Електронна апаратура: дослідження, розробки

Багатофункціональна апаратура передачі та прийому даних Z-501. *В. М. Куценко, Т. В. Левченко* (17)

Система лінійної телемеханіки "Хортиця-М" для газопроводів. *С. В. Дубець, Є. М. Федорченко, В. І. Кузьмінов* (19)

Малогабаритний стаціонарний пірометр з підвищеним температурним розрізненням. *А. М. Ахієзер* (21)

Електроніка та екологія

Аналіз вимірювальних схем автоматичних хемілюмінесцентних газоаналізаторів оксидів азоту та озону. *І. Л. Михеева, В. К. Курінний, В. Ю. Таякін, Л. Д. Мазира* (24)

Система екологічного моніторингу стану повітря уздовж автомагістралей населених пунктів. *Г. О. Дев'ятко, С. А. Лацис, В. Я. Подольський, В. В. Закрасняний* (28)

Технологія виробництва

Виявлення резервів виробництва методами статистичного моделювання за пасивними даними. *Ю. О. Долгов* (30)

Мікрохвильовий нагрів: особливості модернізації технології. *Б. О. Дем'янчук* (41)

Проблеми ресурсозбереження та екологічної безпеки в гальванотехнології. *М. Д. Скубілін, О. В. Письменов, Б. О. Гусев* (46)

Контроль. Якість. Надійність

Метод оперативного тестування обчислювальних пристроїв з плаваючою крапкою. *О. В. Дрозд, М. Б. Копитчук, Є. В. Огинська* (52)

Закономірності деградації світлодіодів. *І. М. Вікулін, В. І. Ірха, Б. В. Коробіцин, В. Е. Горбачов* (55)

Сенсор для контролю процесів формування та набору міцності в'язучих середовищ. *Л. М. Зайченко, О. І. Середюк, В. Д. Фотій, Ю. Ф. Шевчук* (57)

Матеріали електроніки

Ефекти перемикавання та пам'яті в МОН-структурах $Al-SiO_2-Si$. *З. А. Іскендер-заде, М. Р. Ахундов, Е. А. Джафарова, Ш. А. Аліханова* (59)

Термоелектричні властивості сплавів системи $TlInTe_2-TlYbTe_2$. *М. М. Зарбалієв, Н. Ф. Гахраманов, Н. С. Сардарова, Г. А. Гейдарова* (62)

CONTENT

Designing. Construction

The commutational bases electromontaging options estimation at the first stage of programming. *Elizarov B. A., Maksimov A. V., Shelest V. I., Shiryaev Yu. N.* (3)

The enhancement of force component placement algorithm efficiency. *Dmitriev P. I., Zudin S. V., Luzin M. S., Polubasov O. B.* (7)

Changes low-frequency noise in $p-n$ -junctions at low temperatures. *Golovko A. G.* (10)

Mathematical models of thin-film resistor impedance with a size of 5 μm . *Spirin V. G.* (14)

Electronic equipment: investigations, developments

Multipurpose equipment Z-501 for data transferring and receiving. *Kutsenko V. N., Levchenko T. V.* (17)

System of linear telemechanics «Khortitsa» for gas line. *Dubets S. V., Fedorchenko E. N., Kuzminov V. I.* (19)

Small-sized stationary pyrometr with increased temperature sanction. *Akhijezer A. M.* (21)

Electronic and ecology

Analysis of measuring circuits of automatic nitric oxides and ozone chemiluminescent gas analyzers. *Mikhejeva I. L., Kurimyy V. K., Tayakin V. Yu., Mazyra L. D.* (24)

System of ecological monitoring of a condition of air along highways of settlements. *Devyatko G. A., Lacis S. A., Podolsky V. Ya., Zakrasnyaniy V. V.* (28)

Production technology

Passive stochastic methods of manufacture reserve revelation. *Dolgov Yu. A.* (30)

Microwave heating: peculiarities of modernization technology. *Demyanchuk B. A.* (41)

Problems of the savings of resources and ecological safety in technology of galvanic manufacture. *Skubilin M. D., Pismenov A. V., Gusev B. A.* (46)

Control. Quality. Reliability

On-line testing method of floating-point computing circuits. *Drozhd A. V., Kopytchuk N. B., Oginskaja E. V.* (52)

Legitimacies of a degradation of light-emitting diodes. *Vikulin I. M., Irkha V. I., Korobitsyn B. V., Gorbachev V. E.* (55)

The viscous media formation and strengthening processes control sensor. *Zaichenko L. M., Serediuk A. I., Fotiy V. D., Shevchuk Yu. F.* (57)

Materials of electronics

Switching and memory effects in $Al-SiO_2-Si$ MOS structures. *Iskender-zade Z. A., Akhundov M. R., Jafarova E. A., Alikhanova Sh. A.* (59)

Thermoelectric properties of alloys of $TlInTe_2-TlYbTe_2$ system. *Zarbaliyev M. M., Gakhramanov N. F., Sardarova N. C., Haydarova G. A.* (62)

К. т. н. Б. А. ЕЛИЗАРОВ, к. т. н. А. В. МАКСИМОВ,
к. т. н. В. И. ШЕЛЕСТ, к. т. н. Ю. Н. ШИРЯЕВ

Дата поступления в редакцию
04.03 2004 г.

Россия, г. С.-Петербург, НПО «Прибор»; г. Пермь, НПО «Такт»
E-mail: privor@mail.rcom.ru, takt@pi.ccl.ru

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

ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОМОНТАЖНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОММУТАЦИОННЫХ ПЛАТ НА РАННИХ ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЭС

Полученные зависимости позволяют рассчитывать параметры коммутационных (печатных) плат при размещении на них разногабаритных изделий электронной техники.

Среди величин, влияющих на показатели качества радиоэлектронных средств (РЭС), одной из наиболее весомых является площадь коммутационных плат (КП), которая требуется для эффективного размещения заданного состава изделий электронной техники (ИЭТ) на КП. При этом состав ИЭТ на КП определяется принципиальной электрической схемой функционального устройства, размещаемого на КП. Однако на ранних этапах проектирования РЭС в распоряжении конструкторов еще нет готовых электрических принципиальных схем будущих функциональных устройств. Специалисты схемотехнических подразделений могут сообщить лишь наиболее общую информацию о разбиении структурной схемы разрабатываемого РЭС на функциональные устройства, а также о возможных типах и числе ИЭТ, требуемых для реализации конкретных функциональных устройств.

Между тем решение задачи определения требуемых площадей КП именно на ранних этапах проработки будущей конструкции РЭС позволило бы с минимальными затратами решить следующие вопросы:

— оценить объем как вновь создаваемого РЭС в целом, так и объемы функциональных устройств в его составе;

— оперативно проследить изменение геометрических параметров создаваемого РЭС в зависимости от выбранной элементной базы;

— оперативно проанализировать изменение объема РЭС и площадей КП в зависимости от схемы разбиения РЭС на функциональные устройства;

— сделать достоверные выводы об эффективности каждого предлагаемого варианта схемы разбиения РЭС на функциональные устройства и целесообразности применения выбранной элементной базы.

Это позволит еще на ранних этапах проектирования РЭС уверенно дать необходимую информацию для дальнейшей детальной проработки принимаемого технического решения по синтезу разрабатываемого РЭС как конструкторам, так и схемотехникам. Этот вопрос имеет ключевое значение, т. к. ввиду сложности и длительности этапов создания новой техники раз-

работчики оказываются вынужденными следовать в русле тех технических решений, которые они приняли на начальных этапах проектирования.

Площадь КП, требуемая для размещения заданного состава ИЭТ, зависит от множества факторов, отражающих качество выполнения требований полной трассировки электрических цепей, нормального теплового режима и электромагнитной совместимости ИЭТ, методов конструирования и изготовления, механической прочности и многих других. Требуемая площадь КП определяется площадями, занимаемыми корпусами ИЭТ, и дополнительными площадями вокруг них, которые необходимы для выполнения перечисленных выше требований. При этом основным требованием является обеспечение возможности полной трассировки межсоединений, поскольку оно может быть реализовано только на этапе определения требуемой площади КП, в том числе с широко применяемым печатным электромонтажом. Другие требования (например, нормального теплового режима, электромагнитной совместимости, механической прочности) частично, а в некоторых случаях и полностью, могут быть удовлетворены на последующих этапах проектирования дополнительными техническими решениями, в частности, с помощью установки радиаторов, электромагнитных экранов, введения развязывающих ячеек и фильтрующих цепей, использования конструктивных элементов, повышающих жесткость КП.

Предлагаемые в опубликованных работах (например, [1—3]) методы решения этой задачи построены, в основном, на исследовании гипотетических электрических схем максимальной сложности. В [4] приведены статистические зависимости для определения числа трасс печатных проводников, прокладываемых в межэлементных каналах для случаев, когда вся поверхность КП заполнена ИЭТ в однотипных корпусах (однако этот частный случай характерен, в основном, для цифровых РЭС). Эти обстоятельства делают упомянутые варианты решения поставленной задачи недостаточно удобными для практического применения.

С практической точки зрения, больший интерес представляли бы зависимости, позволяющие оценивать эффективную площадь размещения на КП однотипных ИЭТ, т. к. именно этот вариант чаще всего встречается в реальных задачах, стоящих перед разработчиками РЭС. (Под эффективной площадью раз-

мещения ИЭТ понимается площадь, которая необходима для размещения конкретного ИЭТ и для осуществления трассировки его связей с другими ИЭТ, расположенными на КП. Определение эффективной площади, таким образом, является ключевым моментом для оценки площади КП, необходимой для размещения на ней заданного набора ИЭТ.) Поиску таких зависимостей и посвящена настоящая работа.

Геометрические модели размещения ИЭТ со штыревыми и планарными выводами на монтажном поле КП с печатным электромотажом приведены на рисунке. Здесь введены следующие обозначения: H_m и L_m — ширина и длина ИЭТ, соответственно; H_r и L_r — ширина и длина эффективной площади на КП, требуемой для размещения ИЭТ и осуществления трассировки его электромотажных соединений; t — ширина печатных проводников на КП и s — расстояние между ними.

На значение эффективной площади размещения ИЭТ на КП влияет множество факторов (число выводов устанавливаемых ИЭТ, степень связности между ними, искусство разработчика при размещении и трассировке ИЭТ и др.), учесть которые в строгой аналитической форме и в полном объеме заранее невозможно. Поэтому с целью получения аналитических соотношений для расчета эффективной площади, занимаемой ИЭТ на КП, использовались статистические методы. При этом основой для расчета эффективной площади являлись габаритные размеры корпуса ИЭТ и статистическое значение приращения площади размещения ИЭТ на КП (DL).

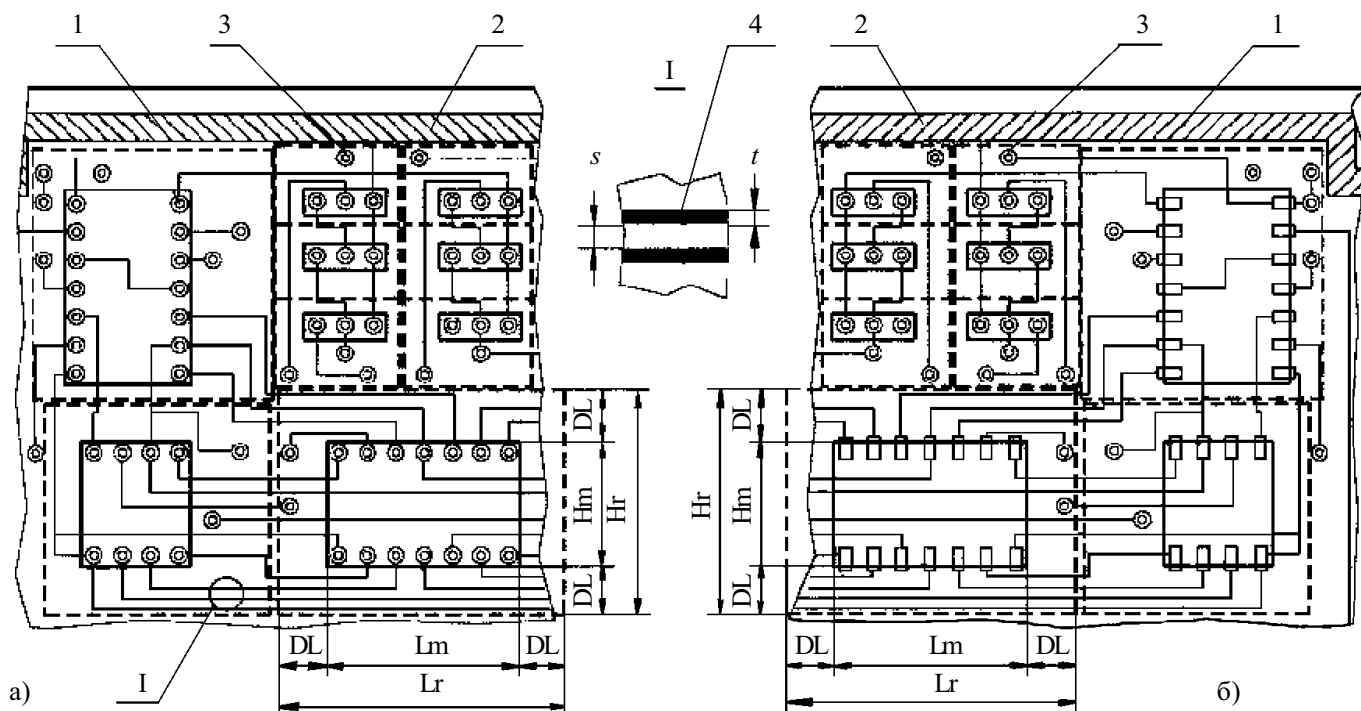
Также было установлено, что к числу факторов, которые в наибольшей степени влияют на значение DL (по сравнению с физическими габаритами корпуса ИЭТ), относятся следующие: число задействованных выводов ИЭТ (K); расстояние между внутренними кра-

ями контактных площадок для выводов ИЭТ (h); среднее число выводов (K_m), приходящихся на каждый ИЭТ с учетом всего набора ИЭТ, устанавливаемых на КП. Влияние числа задействованных выводов ИЭТ на эффективную площадь его размещения очевидно. Величина h начинает сказываться, когда его значение достаточно для прокладки хотя бы одной трассы. Среднее число выводов, приходящихся на каждое ИЭТ, учитывает степень связности между ними, и чем оно выше, тем больше площади должно быть использовано на проведение трасс между ИЭТ.

С целью получения статистических зависимостей между параметрами ИЭТ и требуемой на их размещение эффективной площади были исследованы КП функциональных устройств различных классов современных РЭС, построенных на наиболее широко применяемых зарубежных и отечественных микросхемах в корпусах DIP, SO, 2102, 2103, 402, 405, 4105, 4112, H208 и других. В результате были получены таблицы значений DL в зависимости от K , h , K_m , t , s и числа коммутационных слоев КП (ns , $ns > 1$).

При этом из более 2000 подвергнутых анализу функциональных устройств с применением методов наименьших квадратов и факторного планирования эксперимента исследовано 1600 функционально и конструктивно законченных устройств разного класса, отобранных из общего числа по следующим прогрессивным признакам:

- максимальное заполнение площади КП ИЭТ;
- высокая сложность трассировки электрических цепей;
- разнотипность корпусов размещаемых на КП ИЭТ;
- равномерность размещения ИЭТ по площади КП;
- различные классы плотности проводящего рисунка и типоразмеры КП — (115...265×160...235 мм).



Элементы КП при размещении ИЭТ со штыревыми (а) и планарными (б) выводами:
 1 — контактные площадки; 2 — шины; 3 — переходные отверстия; 4 — печатные проводники

Для получения выражений, фиксирующих аналитические зависимости между DL и средним числом задействованных выводов ИЭТ K , взятые из упомянутых выше статистических таблиц, исследовались полиномиальные модели следующего вида:

$$\overline{DL} = (a_0 + a_1 \times K) / (2 \times ns); \quad (1)$$

$$\overline{DL} = (a_0 + a_1 \times K + a_2 \times K^2) / (2 \times ns), \quad (2)$$

где \overline{DL} — среднестатистическое значение приращения площади размещения ИЭТ на КП;

a_0, \dots, a_2 — коэффициенты полиномов.

В результате вычисления коэффициентов a_0, \dots, a_2 по методу наименьших квадратов и оценки выборочных среднеквадратических отклонений δ_{DL} для аппроксимирующих опытные данные полиномов (1) и (2) установлено следующее.

1. Коэффициенты a_0, a_0' и a_1, a_1' имеют попарно практически равные значения (максимальное относительное расхождение составляет не более 10%) для наборов ИЭТ с одинаковыми h и K_m и разные значения для корпусов с отличающимися h и K_m .

2. Значения коэффициентов a_0, a_0' и a_1, a_1' уменьшаются по мере возрастания h и увеличиваются по мере возрастания K_m .

3. Коэффициент a_2 имеет значение более низкого порядка в сравнении с a_1' , что при возможных значениях K для существующих и, вероятно, для перспективных ИЭТ практически приближает квадратичную зависимость к линейной.

4. Значения среднеквадратических отклонений δ_{DL} , определенных для полинома (2), незначительно меньше (расхождение не более 3%) среднеквадратических отклонений, вычисленных для полинома (1).

5. Статистическая проверка гипотезы о равенстве дисперсий по критерию Кохрена для различных отклонений значений DL от среднего значения при заданных наборах ИЭТ на КП показала, что результаты опыта можно считать однородными и воспроизводимыми с доверительной вероятностью не менее 0,9.

Обобщение выявленных факторов позволяет принять полиномиальную модель вида (1) как практически приемлемую для исследуемой выборки наборов ИЭТ на КП при установлении аналитических зависимостей между величиной приращения площади размещения ИЭТ и средним числом задействованных выводов ИЭТ K .

Кроме этого, проведенные исследования позволяют сделать вывод о существенной зависимости \overline{DL} от h и K_m . Зависимость от h объясняется перераспределением трасс печатного электро монтажа между межэлементной и внутриэлементной площадью КП при наличии такого h , значение которого позволяет проложить хотя бы одну трассу для проводника, причем наряду с шириной проводников следует учитывать минимально допустимое расстояние между ними. Зависимость от среднего числа выводов, приходящихся на каждый ИЭТ с учетом всего набора ИЭТ, устанавливаемых на КП, объясняется увеличением числа более длинных трасс, необходимых для осуществления большего числа электро монтажных соединений.

На основании сопоставительного анализа полученных значений коэффициентов a_0, a_1 , размеров h и величины K_m для исследованных наборов ИЭТ, размещенных на КП, получена аналитическая зависимость вида

$$\overline{DL} = [(a_1 \times K + b_1 \times K_m + a_0) / (2 \times ns)] \times (t + s) - c_1 \times h \times ns. \quad (3)$$

Здесь статистические оценки новых коэффициентов принимают следующие значения: $a_1 = 3,45$; $b_1 = 0,32$; $a_0 = 9,7$; $c_1 = 0,19 \text{ мм}^{-1}$. При этом t, s, h имеют размерность в мм.

В целях установления общего характера зависимости (3) для различных КП была выдвинута и проверена гипотеза о нормальном законе распределения отклонений эффективной площади размещения ИЭТ на КП (Se), взятой из экспериментальных данных, от своего среднестатистического значения \overline{Se} , которое определяется по следующей формуле:

$$\overline{Se} = (Lm + \overline{DL}) \times (Hm + \overline{DL}). \quad (4)$$

Здесь Lm и Hm — соответственно длина и ширина корпуса ИЭТ при известных K, K_m, h, t и s .

При сравнении теоретических и экспериментальных зависимостей установлено, что наименьшая вероятность истинности выдвинутой гипотезы составляет 0,87. На этом основании можно принять гипотезу о нормальном законе распределения отклонений экспериментальных значений Se от рассчитанных по формуле (4).

Проведенные вероятностные расчеты на основе принятой гипотезы показали равенство нулю математических ожиданий отклонений $(Se - \overline{Se})$: $M(Se - \overline{Se}) = 0$. Это подтверждает среднестатистический характер значения эффективной площади размещения ИЭТ на КП, рассчитанного по формуле (4) с помощью формулы (3) при заданных K, K_m, h, t и s . Доверительные интервалы для коэффициентов полинома (3) приведены в **таблице**.

Коэффициенты полинома	Доверительная вероятность P_α		
	$P_\alpha=0,9$	$P_\alpha=0,95$	$P_\alpha=0,99$
$a_1=3,45$	$\pm 0,007$	$\pm 0,009$	$\pm 0,011$
$b_1=0,32$	$\pm 0,005$	$\pm 0,006$	$\pm 0,008$
$a_0=9,7$	$\pm 0,06$	$\pm 0,08$	$\pm 0,11$
$c_1=0,19 \text{ мм}^{-1}$	$\pm 0,003$	$\pm 0,005$	$\pm 0,007$

Выражения (3) и (4) удобны для практической оценки площади КП, необходимой для размещения на ней заданного набора ИЭТ с гарантией осуществления 100%-ной трассировки электрических цепей.

В целях проверки адекватности зависимостей, определенных методом наименьших квадратов, и полученных оценок их коэффициентов был использован современный статистический метод факторного планирования эксперимента. При этом из имеющейся выборки полностью рандомизированным способом взяты выборки меньших и равных между собой размеров для всех исследуемых типов КП. В связи с тем, что установлено влияние только трех факторов (K, K_m и h), исследованию подвергалась математическая модель в виде полинома

$$\overline{DL} = [(a_1 \times K + a_2 \times K_m + a_0) / (2 \times ns)] \times (t + s) - a_3 \times h \times ns, \quad (5)$$

где K, K_m и h варьировались на двух уровнях каждый.

Полный факторный эксперимент типа 2^q (где $q=3$ — число независимых факторов) проводился для различных сочетаний K , K_m и h при одинаковых выборках опытных значений DL .

В результате вычисления статистических оценок коэффициентов полинома (5) a_0, a_1, a_2, a_3 и статистических проверок (на воспроизводимость результатов опытов — проверка гипотезы о равенстве дисперсий по критерию Кохрена, на значимость полученных оценок коэффициентов a_0, a_1, a_2, a_3 по t-критерию Стьюдента и на адекватность математической модели по критерию Фишера — $F_t = 0,83 < 1$) подтверждена зависимость вида (3). При этом значения соответствующих коэффициентов отличаются от ранее определенных в пределах 12%.

Установленная количественная связь между эффективной площадью размещения ИЭТ на КП и параметрами K, K_m, h, t и s , выраженная в формуле (3), может быть практически использована для оценки площадей КП и, соответственно, объема РЭС. Наиболее эффективно применение полученной зависимости в алгоритмах автоматизированного синтеза типоразмеров КП разрабатываемых РЭС.

Следует отметить, что на типоразмер КП оказывает влияние не только суммарная эффективная площадь всех размещаемых ИЭТ, но и конфигурация самой КП. Поэтому в процедуре определения типоразмера КП под заданный набор ИЭТ следует использовать алгоритм, реализующий задачу размещения разногабаритных элементов с частично изменяемой формой. При этом габариты такого элемента по любому из размеров не должны быть меньше размеров корпуса ИЭТ, размещаемого в этом элементе.

Кроме того, для оценки стоимости изготовления синтезированного типоразмерного ряда КП можно применить зависимости, описанные в [5]. Это может

послужить основой для технико-экономического обоснования принимаемого технического решения по синтезу разрабатываемых РЭС.

Таким образом, использование полученных зависимостей дает возможность еще на ранних этапах проектирования РЭС оценить площади коммутационных плат функциональных устройств в составе перспективных РЭС в зависимости от элементной базы и технологии изготовления КП. Это позволит получить представление о габаритных размерах проектируемых РЭС, сделать выводы о качестве принимаемого технического решения и, при необходимости, внести коррективы еще на начальной стадии проектирования РЭС, а также получить необходимую информацию для дальнейшей работы как конструкторам, так и схемотехникам.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Компоновка и конструкции микросерийной аппаратуры / П. И. Овсищев, И. И. Лившиц, А. К. Орчинский и др.— М.: Радио и связь, 1982.
2. Асликян Э. С., Басергян П. Л., Карапетян А. М. Синтез конструктивных параметров ТЭЗ по вероятностной модели монтажной связности // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ.— 1981.— Вып. 6.— С. 57—62.
3. Ломаков Г. И., Муравьев А. Г. К вопросу размещения микросхем на печатной плате логического модуля // Электронная техника. Сер. Микросерийные устройства.— 1983.— Вып. 4.— С. 27—28.
4. Лутченков Л. С. Автоматизированное проектирование несущих конструкций радиоэлектронных средств.— М.: Радио и связь, 1991.
5. Шерин К. Ю. Синтез типоразмерных рядов базовых несущих конструкций радиоэлектронных средств АСУ.— СПб.: СПб.ГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2000.



Украинский проспект электроники

<http://tkec.wallst.ru/elektroniks.html>

Открытое акционерное общество “Научно-производственное предприятие “Сатурн” (ОАО “НПП “Сатурн”)

Киев-148, ГСП 03680, проспект 50-летия Октября, 2-Б,

тел.(38-044) 477-90-18, факс (38-044) 477-62-08.

E-mail:chmil@jssaturn.kiev.ua, jssaturn@adamant.net. Web-сайт: www.jssaturn.com.

Основные направления деятельности предприятия

Сверхмаломощные приемные системы и устройства СВЧ

Медицинская техника на основе СВЧ-технологии

Полупроводниковые приборы на основе арсенидгаллиевой технологии

Криоэлектронные приемно-преобразовательные радиосистемы СВЧ

Радиометрия дм-, см- и мм-диапазонов

Элементы СВЧ-трактов, включая технологию изготовления ГИС



К. т. н. П. И. ДМИТРИЕВ, С. В. ЗУДИН, М. С. ЛУЗИН,
к. т. н. О. Б. ПОЛУБАСОВ

Россия: г. Санкт-Петербург, АО “Авангард”
E-mail: pbas@rol.ru

Дата поступления в редакцию
19.06 2003 г.

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

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИЛОВОГО РАЗМЕЩЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ

Предложена методика вычисления оптимального расположения компонентов, близкого к расположению, обеспечивающему минимум суммарной длины соединений.

Методы размещения компонентов электронных схем можно условно разделить на две группы — создающие начальное размещение и улучшающие уже существующее. Улучшающие методы, в основном, сводятся к перестановкам компонентов — парным или групповым. В качестве минимизируемого критерия обычно используется суммарная длина связей или, в более поздних вариантах, нагруженность сечений. Методы начального размещения более многочисленны — от чисто топологических до чисто алгебраических. Наиболее распространены методы последовательной установки компонентов на основе связности, методы, основанные на разбиении (чаще всего дихотомическом), методы, основанные на группировании, и методы силового размещения.

Силовое размещение давно входит в список классических методов САПР [1—5], однако по ряду причин на практике используется недостаточно широко. В данной работе обсуждаются нюансы, учет которых позволяет существенно повысить быстродействие и качество получаемых решений по сравнению с традиционными подходами.

Математическая модель силового размещения — квадратичный функционал и минимизирующая его система линейных уравнений — широко использовалась в ранее развитой теории электрических цепей, так что аппарат исследован всесторонне.

Функционал Φ выражает сумму квадратов длин проводников —

$$\Phi = \sum_{i,j} a_{ij} (x_i - x_j)^2 + \sum_{i,j} a_{ij} (y_i - y_j)^2,$$

где x, y — координатные векторы для контактов компонентов;

a_{ij} — представляет связность компонентов i и j .

Функционал имеет единственный минимум, который можно найти, приравняв нулю все частные производные:

$$\frac{\delta\Phi}{\delta x_i} = 0 \Rightarrow \sum_j a_{ij} (x_i - x_j) = 0;$$

$$\frac{\delta\Phi}{\delta y_i} = 0 \Rightarrow \sum_j a_{ij} (y_i - y_j) = 0.$$

После очевидных преобразований получим следующие равенства:

$$x_i = \frac{\sum_j a_{ij} x_j}{\sum_j a_{ij}}; \quad y_i = \frac{\sum_j a_{ij} y_j}{\sum_j a_{ij}}. \quad (1)$$

Правые части этих равенств аналогичны известным формулам вычисления центра масс системы материальных точек.

В [3] показано, что силовое размещение позволяет уложить на плоскости планарную точечную модель схемы без пересечений, что является сильным аргументом в пользу применения этого метода, например, для схем с однослойной коммутацией.

Однако следует сделать несколько замечаний.

1. Не всем авторам известно, что существуют быстрые итерационные способы решения приведенной системы уравнений, которые не требуют обращения матриц [3, 4, 6].

Задача размещения может быть решена путем последовательного расчета оптимальных положений каждой ячейки, считая остальные ячейки неподвижными. Это соответствует процедуре покоординатного спуска. Для получения хорошего приближения достаточно всего нескольких уточняющих итераций. Число необходимых итераций зависит от близости начального расположения ячеек к оптимальному, от диаметра графа связей и от порядка обработки ячеек. Число операций на каждой итерации пропорционально числу ненулевых элементов матрицы \mathbf{A} , т. е. числу связей. Коэффициенты связи a_{ij} в процессе расчета не изменяются.

2. Силовое размещение дает приемлемое решение только для весьма специфических сетей, на реальных же примерах компоненты имеют тенденцию перекрываться, поэтому полученное силовым методом решение всегда нуждается в коррекции. Для этого используются методы дискретизации координат компонентов, например, метод приведения по квадрантам.

3. Силовое размещение минимизирует сумму квадратов длин и, вопреки утверждениям некоторых авторов, не обеспечивает глобального минимума суммарной длины проводников.

Поясним последнее замечание более подробно, рассмотрев одномерный случай.

Пусть имеется пара закрепленных с интервалом n компонентов и требуется разместить компонент, связанный с ними. Если размещаемый компонент имеет одинаковое количество связей с закрепленными компонентами, то оптимум, определяемый по формулам (1), находится посередине между ними (рис. 1).

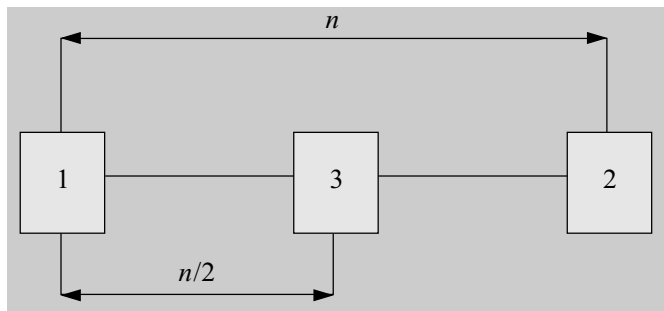


Рис. 1. Силовое размещение компонента (равное число связей с закрепленными компонентами)

Если число связей с размещаемыми компонентами не одинаково, то оптимальная для размещения компонента точка лежит на прямой, соединяющей размещенные компоненты, на расстоянии от них, обратно пропорциональном числу связей размещаемого компонента с размещенным (рис. 2). Таким образом, координаты оптимума зависят как от расстояния между размещенными компонентами, так и от числа связей с ними размещаемого компонента.

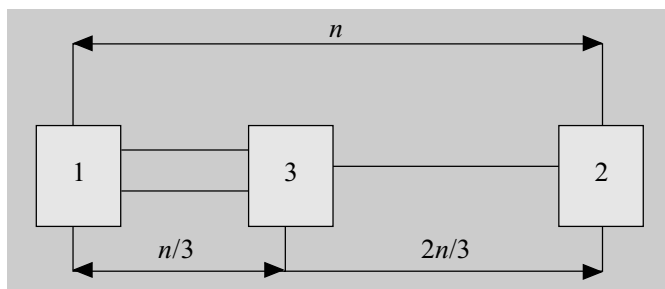


Рис. 2. Силовое размещение компонента (неравное число связей с закрепленными компонентами)

Если же критерием оптимальности является суммарная длина соединений, то при равном числе связей размещаемого компонента с парой размещенных перемещение его вдоль отрезка, соединяющего центры размещенных компонентов, не изменяет суммарной длины соединений. Оптимумом является любая точка этого отрезка (интервал между размещенными компонентами), а не одна точка посередине. И хотя суммарная длина не изменяется, перемещение без уменьшения длины дает дополнительные возможности для оптимизации размещения.

Когда же число связей с размещаемыми компонентами не одинаково, то минимум суммарной длины обеспечивается размещением в непосредственной близости от компонента, связанного с размещаемым максимальным числом связей, — вне зависимости от числа связей и координат другого компонента (рис. 3). Смещение от этой позиции увеличивает суммарную длину соединений.

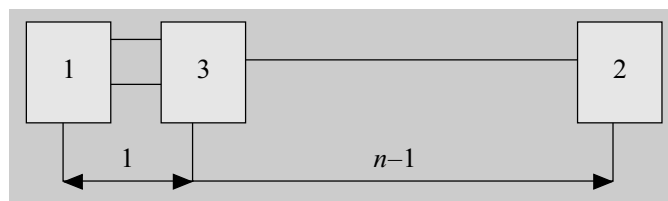


Рис. 3. Оптимальное размещение компонента по критерию минимума суммарной длины соединений

Процесс размещения итерационный. На каждой итерации происходит расчет координат компонентов в текущей области размещения на основе квадратичного функционала. После этого происходит разделение области размещения на две области и осуществляется следующая итерация для каждой из областей. При дискретизации решения, основанной на разбиении монтажного пространства, оптимальная точка легко может оказаться за пределами области размещения. В этом случае несоответствие критериев особенно сильно отражается на результате размещения.

Для снижения влияния указанного негативного фактора предлагается при подсчете использовать не координаты закрепленных компонентов, лежащих за пределами допустимой области размещения, а координаты проекций их контактов на область размещения (рис. 4). То есть если в некоторой области имеются компоненты, связанные с компонентами, находящимися в других областях, то в расчете

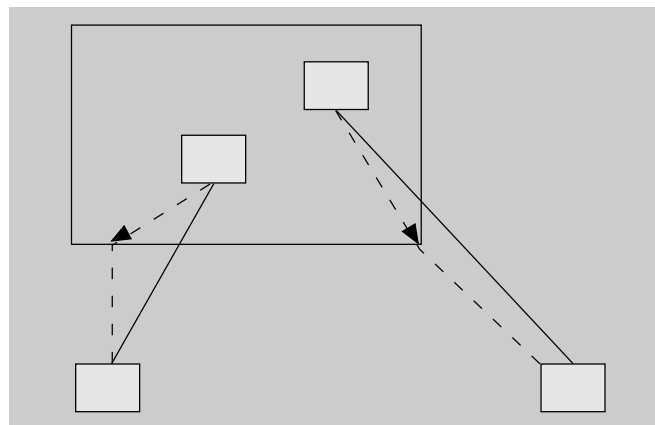


Рис. 4. Коррекция координат компонентов

учитывается квадрат расстояния не до такого компонента, а до его проекции на область размещения. Поскольку после каждого разделения размеры области размещения уменьшаются, то происходит постепенная коррекция координат компонентов, приближающая их к точке, оптимальной по критерию минимальной суммарной длины.

На рис. 5 приведен пример одномерного случая с равномерным разбиением области размещения (в данном случае интервала).

Важно подчеркнуть, что, в отличие от традиционных подходов [6], при расчете используются координаты контактов, а не центров компонентов. Кроме того, при перемещении компонента проверяются все восемь (с учетом стороны установки) возможных его ориентаций с перестроением связывающих деревьев и выбором лучшего варианта.

При дискретизации координат компонентов область размещения разбивается на части, площадь ко-

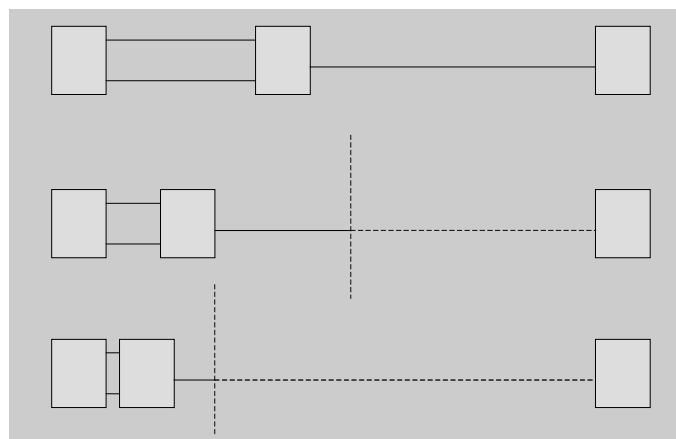


Рис. 5. Иллюстрация коррекции силового размещения

торых пропорциональна площади попавших в них компонентов, причем традиционный подход заключается в разделении области (прямоугольной) поперек длинной стороны с чередованием соответственно вертикальных и горизонтальных разрезов.

В отличие от традиционного подхода, описываемая методика предполагает разбиение с учетом размеров и ориентации компонентов, поэтому возможны ситуации, когда осуществляются несколько вертикальных или горизонтальных разбиений подряд.

Кроме того, при вычислении площади области вводятся поправочные коэффициенты, учитывающие число задействованных контактов каждого из компонентов, что позволяет многоконтактным компонентам получить добавочный ресурс, необходимый для прокладки соединений.

Для многозвенных цепей вычисляются кратчайшие связывающие деревья [7], и в расчетах участвуют только звенья этих деревьев, а не полные графы для каждой из цепей, как в большинстве реализаций.

Таким образом, предложенная методика включает:

- вычисление оптимального расположения компонента, близкого к расположению, обеспечивающему минимум суммарной длины соединений, но обладающего меньшей комбинаторной сложностью;

- дискретизацию решения с учетом размеров, ориентации компонентов и числа задействованных контактов;

- построение (перестроение) кратчайших связывающих деревьев каждой из цепей.

Реализация методики с учетом указанных нюансов позволила получить достаточно эффективную программу автоматического размещения компонентов AuTOP (AuTO Placer).

При запуске программы начинается автоматический поиск вариантов размещения. На первой итерации используются координаты компонентов исходного варианта размещения. Если компоненты предваритель-

но не размещались, то все они расположены в точке с координатами (0,0), и кратчайшие деревья для цепей мало отличаются от случайных.

Последующие итерации используют кратчайшие связывающие деревья, полученные на основе предыдущего размещения компонентов. Размещение продолжается, пока пользователь не остановит этот процесс. Во время размещения пользователю предоставляется возможность видеть лучший (по критерию длины соединений) результат. Если полученный результат удовлетворяет пользователя, то он останавливает процесс размещения, сохраняет его и переходит к следующим этапам проектирования.

О быстродействии программы позволяет судить приведенная **таблица**.

Число компонентов	Суммарное число контактов	Число вариантов за 1 мин
37	554	2714
150	1187	383
367	1745	144

Программа AuTOP позволяет быстро найти приемлемый вариант взаимного расположения компонентов, но она не контролирует соблюдение конструктивно-технологических ограничений. Поэтому варианты плат с высокой плотностью компоновки, полученные с помощью программы автоматического размещения, обычно нуждаются в редактировании для ликвидации нарушений (узких мест и пересечений контуров компонентов). Обычно для этого достаточно нескольких минут.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Селютин В. А. Машинное конструирование электронных устройств.— М.: Сов. радио, 1977.
2. Тетельбаум А. Я. Силовое размещение планарного графа // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика.— 1988.— № 3.— С. 131—137.
3. Тетельбаум А. Я. Об одном методе оптимального размещения конструктивных единиц и внешних контактных площадок / В кн.: Автоматизация проектирования в электронике. Вып. 11.— Киев: Техника, 1975.— С. 98—103.
4. Петренко А. И., Тетельбаум А. Я. Формальное конструирование электронно-вычислительной аппаратуры.— М.: Сов. радио, 1979.
5. Полубасов О. Б., Зудин С. В. К вопросу о квадратичном размещении ячеек на БИС // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 1999.— № 5—6.— С. 10—13.
6. Parakh Ph. N., Brown R. B., Sakallah K. A. Congestion driven quadratic placement / 35th Design Automation Conference.— San Francisco, Calif.— 1998.— P. 275—278.
7. Зудин С. В., Лузин С. Ю., Полубасов О. Б. Выбор конфигурации соединения компонентов электронных схем до этапа размещения // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2001.— № 4—5.— С. 3—6.

К. ф.-м. н. А. Г. ГОЛОВКО

Украина, г. Херсон, НПФ «Артур»
E-mail: argo_m@ukr.net

Дата поступления в редакцию
10.09 2003 г.

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

ИЗМЕНЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ШУМОВ В p - n -ПЕРЕХОДАХ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Предлагается при разработке аппаратуры предварительно оценивать стабильность работы полупроводниковых датчиков в диапазоне пониженных температур.

Дальнейшее развитие отечественной электронной техники, несомненно, будет сопровождаться ускоренным освоением области работы датчиков и электронной аппаратуры при пониженных и крайне низких температурах. Однако разработчики аппаратуры еще не располагают полными данными о температурных зависимостях шумовых свойств всего многообразия применяемых датчиков. Вместе с тем эти зависимости в значительной степени определяют стабильность работы, чувствительность и помехозащищенность системы и должны быть известны. Поэтому на примере температурных исследований флуктуаций, возникающих в прямосмещенных p - n -переходах, предлагаем разработчикам проводить свой оценочный анализ возможных проявлений шумов используемых ими датчиков.

В работах [1, 2] раскрыта функция преобразования флуктуации проводимости датчика $S_u(f)$ с нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ) во флуктуацию падения напряжения. Аналогичные экспериментальные исследования проведены нами на диоде, изготовленном из арсенида галлия, в температурном диапазоне 78—300 К. По данным разработчиков диодов, концентрация доноров в n -области (Te) составляла $n=4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, акцепторов в p -области (Zn) — $p=2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Площадь перехода была близкой 1 мм². Ток насыщения при комнатной температуре составлял 3,7 мкА. В качестве шумового параметра измерялась среднеарифметическая величина флуктуаций падения напряжения $\langle |\delta u(t)| \rangle$ на частоте 700 Гц в полосе частот 70 Гц. Он пересчитывался в «текущий спектр» $S_u(f)$, как это описано в работе [1].

На рис. 1 представлен график токовой зависимости шумов при комнатной температуре. На нем горизонтальной штриховой линией отмечен уровень шумов входных каскадов усилителя, который вычитался из результатов измерений. Характер токовой зависимости флуктуаций полностью совпадает с полученной зависимостью для барьеров Шоттки (см. рис. в [1]). Он соответствует найденной нами [2, ф-ла (3)] функции преобразования флуктуации электропроводности $\delta g(t)$ образца во флуктуацию напряжения $\delta u(t)$:

$$\delta u(t) = -\delta g(t) r_d U, \quad (1)$$

где r_d — дифференциальное сопротивление образца, U — падение напряжения на нем.

Как известно [3], в металлических образцах снижение температуры приводит к уменьшению шумов. Однако для нашего полупроводникового образца снижение рабочей температуры от комнатной до азотной привело к совершенно неожиданному и очень сложному росту уровня шумов.

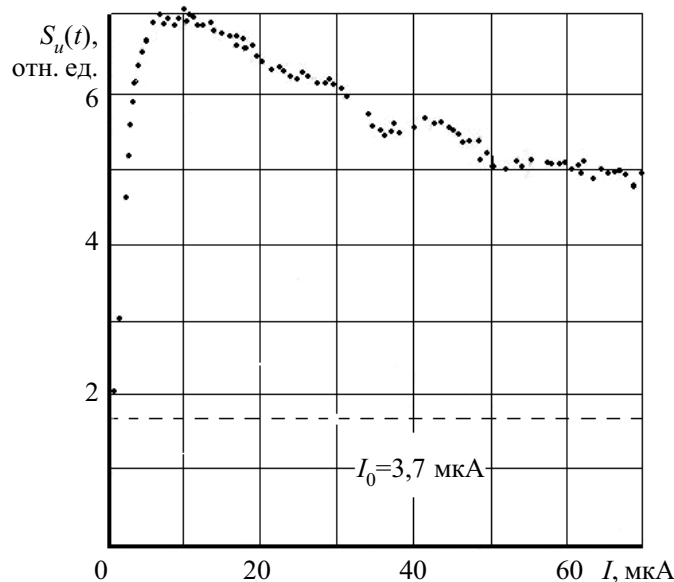


Рис. 1. Токовая зависимость шумов для исследуемого образца при комнатной температуре

На рис. 2 приведен трехмерный график зависимости $S_u(f)$ от температуры и силы тока. Четко выражены три участка резкого повышения шумов. Один из них — с температурно-независимым максимумом — находится в области самых малых смещений. И два участка — с температурно-зависимыми максимумами. Заранее предвидеть такой ход событий было невозможно, и только тщательность проведения эксперимента разделили и четко ограничили области повышенных флуктуаций напряжения.

Таким образом, данные экспериментальные исследования предупреждают разработчиков радиоэлектронной аппаратуры о том, что применение известных датчиков в новой температурной области чревато существенным ухудшением стабильности их работы.

Причину и характер полученных зависимостей нам удалось расшифровать исходя из рассмотрения шу-

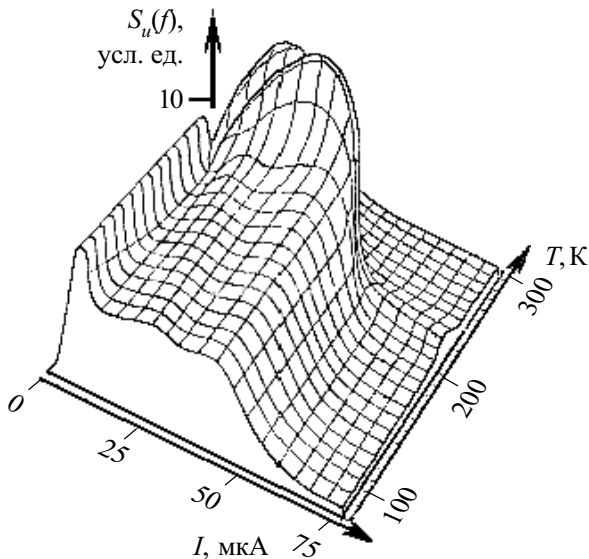


Рис. 2. Зависимость низкочастотных флуктуаций напряжения в $p-n$ -переходе на основе арсенида галлия от температуры и силы тока

мов как результата протекания процессов обмена носителями зарядов между примесными локализованными состояниями и разрешенными зонами. Рассмотрим этот процесс более детально на качественном уровне.

Сначала рассмотрим указанные процессы в базовой n -области $p-n$ -перехода. В условиях термодинамического равновесия концентрация подвижных электронов n устанавливается на уровне, определяемом известным соотношением [4, с. 42, ф-ла (28)]

$$n = 0,5 \cdot (N_d N_c)^{1/2} \exp[-(E_d/2kT)], \quad (2)$$

- где N_d — концентрация доноров;
- N_c — плотность электронных состояний в зоне проводимости;
- E_d — энергия активации донора;
- k — постоянная Больцмана;
- T — абсолютная температура.

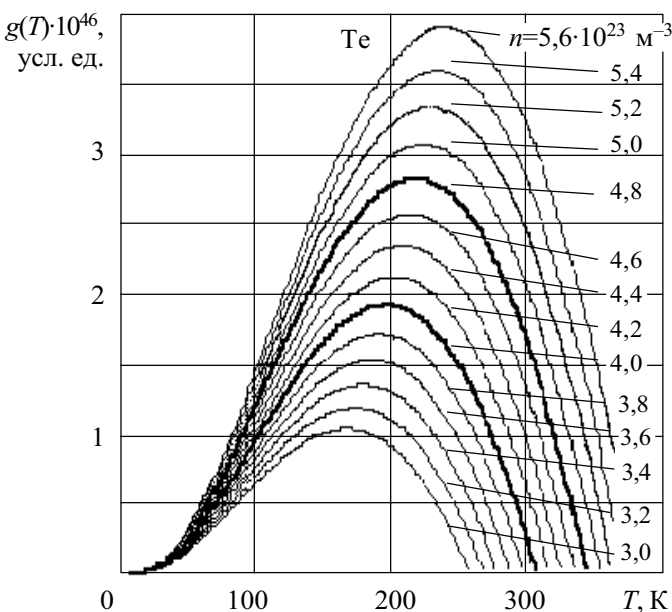


Рис. 3. Расчет скорости обмена электронами между донорным уровнем и зоной проводимости базовой области диода в зависимости от концентрации примеси

Однако при этом происходит постоянный процесс генерации подвижных электронов и их рекомбинации. В равновесии скорость обмена электронами между донорным уровнем и зоной проводимости определяется соотношением

$$g_n(T) = \beta_n (N_d - n) N_c \exp[-(E_d/kT)], \quad (3)$$

- где β_n — коэффициент генерации электронов;
- $(N_d - n)$ — концентрация неионизированной примеси.

Аналогично, для акцепторов в p -области полупроводника

$$g_p(T) = \beta_p (N_a - p) N_v \exp[-(E_a/kT)], \quad (4)$$

- где N_a — концентрация акцепторной примеси;
- p — концентрация подвижных дырок.

Соответственно

$$p = 0,5 \cdot (N_c N_v)^{1/2} \exp[-(E_a/2kT)]. \quad (5)$$

Для наглядности на рис. 3 представим рассчитанные по формуле (3) температурные зависимости скорости генерации электронов для различных значений концентрации теллура. Аналогично на рис. 4 приведены расчетные графики согласно (4) для дырок другой базы $p-n$ -перехода. Видно, что скорость генерации (обмена носителями зарядов) с увеличением температуры растет, достигает максимума и затем, по мере истощения примесей, стремится к нулю. Процесс, как видно, чувствителен к величине концентрации примесей. Избежать его невозможно, но он ограничен рамками определенного температурного диапазона. И при необходимости обеспечения стабильности работы датчика в этом диапазоне температур следует подобрать тип полупроводника и примеси, ее концентрацию.

Тут очевиден факт, что каждый акт генерации и рекомбинации носителя зарядов вызывает в электрической цепи элементарный импульс тока. Эти импульсы в совокупности приводят к формированию флуктуаций падения напряжения на образце, измеряемых как шумы. Очевидно также, что увеличение скорости

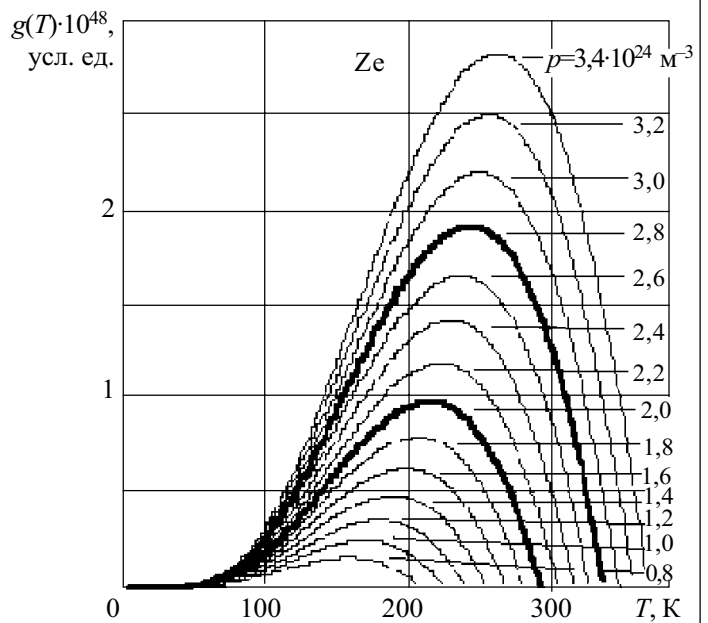


Рис. 4. Расчет скорости обмена дырками между акцепторным уровнем и валентной зоной базовой области диода в зависимости от концентрации примеси

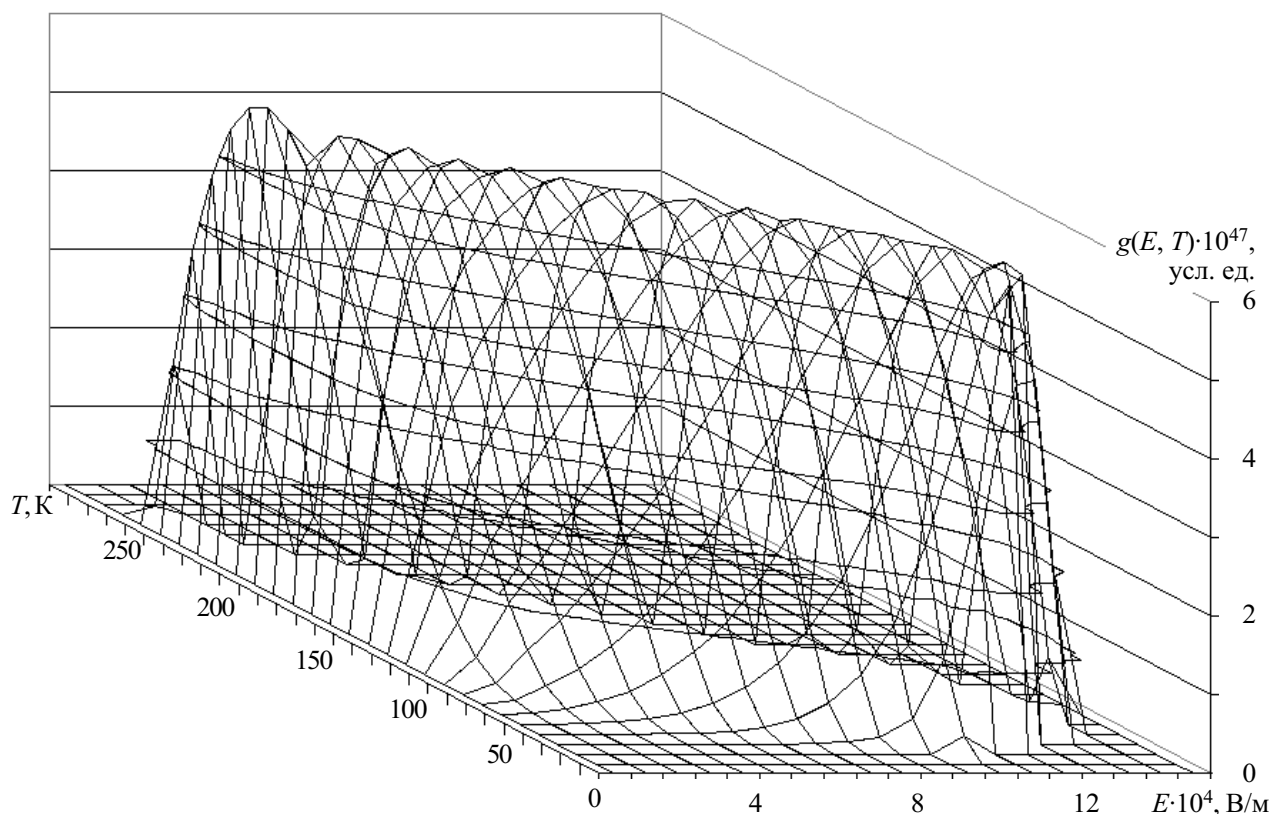


Рис. 5. Расчет скорости обмена электронами между примесным уровнем и зоной проводимости при френкелевской ионизации в обедненном слое p - n -перехода

ти обмена носителями зарядов приводит к росту шумов, истощение же примеси приводит к снижению шумов. Однако пока не установлено, линейная ли это зависимость. Тем не менее, видно качественное подобие шумовых и генерационно-рекомбинационных кривых для p - n -перехода.

Сложность сопоставления состоит в том, что на графиках рис. 3, 4 отражены процессы, протекающие без приложения внешнего напряжения. Они являются причиной флуктуаций электропроводности образца и отражаются в составляющей $\delta g(t)$ выражения (1). Электрическая цепь преобразует флуктуации так, что максимум шумов на токовой оси располагается при токе, в 1,718 раз превышающем ток насыщения соответствующей электронной или дырочной составляющей.

Для каждого значения температуры шумы имеют свой максимум на токовой оси. Зависимость высоты этих максимумов от температуры можно сопоставить с кривыми скорости протекания обменных процессов. У нас два таких температурно-зависимых процесса — для n - и для p -области. По положению иного максимума — максимума интенсивности обмена на температурной оси — можно оценить концентрацию соответствующей примеси. Эти значения оказывались для нас несколько большими тех величин, которые указали изготовители непосредственно для области p - n -перехода — соответственно концентрация теллура $4,8 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ и цинка — $2,8 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$. Есть некоторые основания считать, что шумовые кривые дают более правильные значения реальной концентрации примесей в «шумящих» областях.

Однако возникновение области температурно-независимых максимумов этим механизмом объяснить сложно. Подсказку дают совершенно другие наши экспериментальные исследования шумов, проведенные в нелинейных резисторах (варисторах) [5]. Они выявили подобную ситуацию: каждая шумовая кривая обладает максимумом, форма кривой меняется от температуры, но высота максимума от нее не зависит. Это может быть объяснено френкелевской ионизацией примеси в обедненной области p - n -перехода. Вследствие искривления энергетических зон для зарядов примесей высота потенциального барьера снижается на величину δE [6, с. 418]:

$$\delta E = 2(q^3/\epsilon)^{1/2} E_u^{1/2}, \quad (6)$$

где q — элементарный заряд;

ϵ — диэлектрическая проницаемость среды;

E_u — напряженность электрического поля.

Поэтому для расчета скорости протекания обменных процессов в выражениях (2)—(5) энергии активации примесей следует уменьшать на эту величину δE . На рис. 5 приведен расчетный график этого процесса.

Обращает на себя внимание особенность: максимальная интенсивность обмена не зависит от температуры, за исключением участков резкого падения в области нулевой температуры и температуры истощения примеси. Именно последнее выявили наши исследования шумов в p - n -переходе. Температура истощения примеси весьма чувствительна к величине концентрации примеси. Ее значение подтверждает, что в области пространственного заряда концентрация доноров совпадает с величиной, указанной изготовителем p - n -перехода. Для выявления кривых акцептор-

ной примеси точности наших шумовых измерений, по-видимому, пока не достаточно.

Таким образом, мы на качественном уровне рассмотрели возможные версии объяснения полученных очень сложных экспериментальных зависимостей низкочастотных флуктуаций напряжения от температуры и силы тока. Оценочные расчеты говорят в пользу того, что шумы по мере роста смещения сначала вызваны френкелевской ионизацией примесей в обедненной области. При этом максимальная интенсивность шумов не зависит от температуры. С истощением этих примесей по мере роста смещения в шумах проявляются генерационно-рекомбинационные процессы в базовых областях. Крайне низкие уровни смещения пока не позволяют наличными аппаратурными средствами изучить ВАХ при френкелевской ионизации для получения полной картины генерации шумов. Отдельная задача — математическое моделирование рассмотренных процессов.

Исследования показали, что разработчикам электронной аппаратуры при намерении использовать датчики при пониженных температурах сначала необходимо изучить стабильность их работы в таком диапазоне. При невозможности сделать это эксперимен-

тальными средствами можно провести качественные расчеты скорости протекания обменных процессов для данного полупроводника, типа и концентрации примеси. Возможно, что для обеспечения заданной стабильности работы датчиков необходимо будет использовать специфичные полупроводники и ограничиться строго определенными примесями и их концентрацией.

Считаем, что существует возможность вполне критично и грамотно подойти к решению проблемы обеспечения стабильности работы датчиков при пониженных температурах.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Головкин А. Г. Преобразование низкочастотных флуктуаций электропроводности в датчиках с нелинейной ВАХ // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2003. — № 4. — С. 50—51.
2. Головкин А. Г. Физический принцип преобразования флуктуаций в датчиках // Там же. — 2003. — № 6. — С. 47—48.
3. Букингом М. Шумы в электронных приборах и системах. — М.: Мир, 1986.
4. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. — М.: Энергия, 1973.
5. Головкин А. Г. 1/f-шумы варисторов // Изв. вузов. Физика. — 1980. — № 11. — С. 11—15.
6. Киреев П. С. Физика полупроводников. — М.: Высш. школа, 1975.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

7—10

СЕНТЯБРЯ 2004 г.
РОССИЯ, МОСКВА
ВЦ "КРОКУС ЭКСПО"



третья международная специализированная выставка

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА



СВЯЗЬ

' 2004

- ▶ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ
- ▶ ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ И МАТЕРИАЛЫ
- ▶ НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ
- ▶ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ
- ▶ МЕНЕДЖМЕНТ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
- ▶ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

ОРГКОМИТЕТ:
тел: (+7 095)
937-4081
937-4082 
INTERMATIC@MIIF.RU
WWW.MIIF.RU

К. т. н. В. Г. СПИРИН

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

Дата поступления в редакцию
17.09 2003 г. — 01.03 2004 г.

Оппонент д. т. н. Ю. В. ПАНФИЛОВ
(МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва)

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО РЕЗИСТОРА С РАЗМЕРАМИ 50 мкм

Рассмотрены основные виды погрешностей и их влияние на формирование сопротивления тонкопленочного резистора. Предложены более точные модели расчета.

Сопротивление тонкопленочного резистора (ТПР) прямоугольной формы определяется выражением [1, с. 73]

$$R = \rho l/b = \rho K_{\phi}, \quad (1)$$

где ρ — удельное поверхностное сопротивление резистивной пленки;

l, b — длина и ширина резистивного элемента;

K_{ϕ} — коэффициент формы резистора.

Однако применение математической модели (1) сопротивления ТПР при проектировании микросборок (МСБ) с размерами топологических элементов менее 0,2 мм характеризуется значительным снижением выхода годных.

Настоящая работа посвящена поиску более точной математической модели расчета сопротивления тонкопленочного резистора и его погрешности.

Выход годных МСБ напрямую связан с попаданием сопротивлений ТПР в заданное поле допуска. Если рассмотреть реальное распределение сопротивлений резисторов, то нетрудно заметить, что даже в годных МСБ практически все резисторы имеют отклонение сопротивлений от их номинального значения, причем некоторые сопротивления могут находиться на противоположных границах поля допуска. Однако в этих же МСБ можно найти хотя бы один резистор, сопротивление которого почти точно соответствует его номинальному значению. Это обусловлено тем, что на формирование сопротивления ТПР влияет большое количество погрешностей, все многообразие которых можно разделить на два класса:

- производственные, т. е. погрешности, формируемые при производстве МСБ;
- инструментальные, т. е. погрешности, вносимые основным инструментом получения рисунка МСБ — фотошаблоном (ФШ).

В свою очередь, инструментальные погрешности можно разделить на методические, субъективные и производственные погрешности изготовления ФШ.

Методические погрешности формируются из-за того, что применяемые математические модели расчета сопротивления ТПР (1) и его погрешностей являются приближенными и не учитывают особенностей конст-

рукций ТПР, например, сопротивления его электродов, а также систематических производственных погрешностей, которые возникают в реальном технологическом процессе. Субъективные погрешности, в основном, связаны с невнимательностью проектировщиков МСБ. Ошибки такого рода приводят, как правило, к неверному определению числа квадратов резистора.

Производственные погрешности ТПР образуются в процессе их изготовления. Основными видами этих погрешностей являются погрешности удельного поверхностного сопротивления, погрешности длины и ширины ТПР. (Еще одной разновидностью производственных погрешностей ТПР является погрешность переходного сопротивления областей контактов резистивной и проводящей пленки [1], однако эту погрешность невозможно рассчитать с достаточной степенью точности и трудно измерить, и она в данной работе не рассматривается.)

Каждый из перечисленных видов основных погрешностей имеет систематическую и случайную составляющие. Физическая природа некоторых видов погрешностей рассмотрена в [2]. Основной вклад в систематическую погрешность удельного поверхностного сопротивления вносят градиентная погрешность [2, с. 169] и погрешность, зависящая от ориентации резистивного элемента на подложке [3].

Градиентная погрешность (погрешность толщины пленки) — параметр, определяющий невоспроизводимость резисторов из-за градиентов технологических параметров напыления и термостабилизации по подложке. Основные источники градиентной погрешности — градиент температуры по поверхности подложки и градиент скорости нанесения резистивной пленки во время всего технологического цикла напыления. При вращении подложек на дисках или барабанах выравнивается распределение конденсата в направлении движения подложек, но сохраняется его неоднородность в перпендикулярном направлении — из-за пространственной неоднородности потока. Эффективное выравнивание конденсата по поверхности подложки может быть достигнуто с помощью специально спроектированной (корректирующей) диафрагмы. Обычно направление вращения подложек на барабанах совпадает с более длинной стороной подложки, поэтому в дальнейшем будем считать, что длинная сторона подложки ориентирована вдоль оси X , а короткая сторона — вдоль оси Y . Отсюда градиентную погрешность можно разложить на две составляющие: δr_x и δr_y , которые распределены соответственно по оси X и по оси Y .

В [3, 4] проведены исследования градиентной погрешности. Напыление резистивного сплава РС-3710 производилось на вращающиеся подложки ионно-плазменным методом на установке УВН-75П-1. В итоге получены примерно одинаковые результаты распределения градиентной погрешности по поверхности подложки. Средняя неравномерность удельного поверхностного сопротивления с номинальным значением 1 кОм/□ на ситалловых подложках составила: $\delta\rho_x = 1...3\%$ и $\delta\rho_y = \delta\rho_c = 6...7\%$. Следует отметить, что зависимость градиентной погрешности $\delta\rho_c$ от параметра Y (рис. 1) носит нелинейный характер.

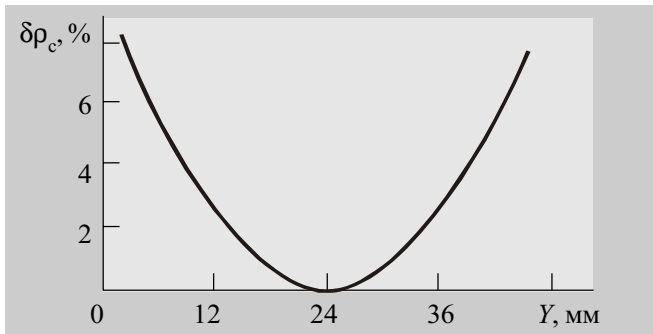


Рис. 1

В [3] показано, что в пределах одной подложки различие сопротивлений резисторов, расположенных параллельно и перпендикулярно оси вращения барабана, составляет 4—7%. Проведенные автором исследования для резистивного материала РС-3710 показывают, что наблюдается устойчивое различие в величинах удельного поверхностного сопротивления по осям X и Y подложки ($\rho_x > \rho_y$). Это различие можно оценить коэффициентом анизотропии $K_a = \rho_x / \rho_y - 1$. Коэффициент анизотропии для резисторов, изготовленных на ситалловых подложках ($\rho = 1000$ Ом/□), составляет 3,4 — 11,6%, а для резисторов, изготовленных на поликорковых подложках ($\rho = 100, 200, 300, 500$ Ом/□), коэффициент анизотропии составляет 1,1 — 9,8%. Причем ярко выраженной зависимости коэффициента анизотропии от величины ρ не наблюдалось.

Учитывая, что толщина пленок РС-3710 в проведенном эксперименте не превышала 20—50 нм, что сравнимо с пиками бугорков подложки, то данное явление можно объяснить методами полировки подложек, разными профилями бугорков на их поверхности, а также неравномерной конденсацией и кристаллизацией резистивной пленки в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Для исключения данного вида погрешности все резисторы по длине должны иметь одинаковое направление на плате.

Точность размеров элементов микросхем зависит, главным образом, от качества и стабильности процессов фотолитографии и влажного травления. Практика свидетельствует, что в процессе изготовления МСБ не удастся получить полностью воспроизводимые размеры однотипных элементов даже в том случае, если партия подложек подвергалась фотолитографической обработке и травлению на одном и том же оборудовании, одним и тем же персоналом и с применением одних и тех же материалов.

Существует большое число факторов, определяющих погрешности размеров элементов. Основные

погрешности возникают из-за засветки фоторезиста под элементами ФШ вследствие явления дифракции и отражения света от подложки, а также за счет рассеяния света на неоднородностях фоторезиста; переэкспонирования и перепроявления фоторезиста; нарушения адгезии фоторезиста к поверхности пленки; большого зазора между ФШ и фоторезистом на подложке, который определяется валиком фоторезиста, образующимся по краю прямоугольной подложки, неплоскостностью ФШ и подложки, а также частицами пыли, попавшими между ФШ и подложкой; подтравливания пленки вследствие изотропности ее травления.

Для получения рисунка МСБ применяют, как правило, позитивные фоторезисты. Увеличение зазора между ФШ и подложкой увеличивает размер засветки фоторезиста на границе элемента ФШ. Засветка фоторезиста приводит к его разрушению при проявлении, а следовательно, к уменьшению размеров элементов фоторезистивной маски. Размер изображения в позитивных фоторезистах сильно зависит от сочетания времени экспонирования и проявления. Переэкспонирование и перепроявление фоторезиста еще более уменьшает размеры элементов.

Размер подтравливаемого участка пленки зависит от качества фоторезиста, его адгезии к поверхности пленки, от свойств материала, подвергающегося травлению, и от свойств используемого травителя. Следует иметь в виду, что сильные химические травители (такие, например, как фтористоводородная кислота, применяемая при травлении керметов, резистивных сплавов) частично разрушают и фоторезистивную маску. Это приводит к неконтролируемому изменению площади травления и еще большему снижению точности конфигурации элементов МСБ.

Профили фоторезиста и тонких пленок, получаемых в процессе фотолитографии, показаны на рис. 2, где $\Delta l_{\text{флс}}$ — систематическая погрешность размера топологического элемента. Систематическая погрешность, вследствие рассмотренных выше физических явлений, приводит к уменьшению размеров проводников и контактных площадок (КП) МСБ.

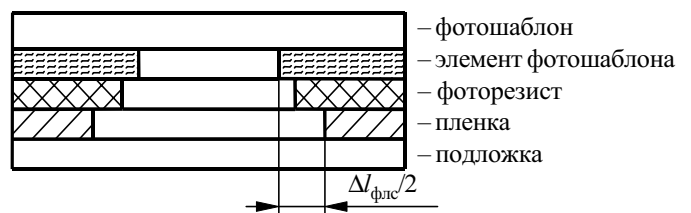


Рис. 2. Профили фоторезиста и тонких пленок после травления

Одним из ограничений при проектировании тонкопленочных МСБ, которое сужает диапазон сопротивлений ТПР, изготавливаемых на одной плате в едином технологическом цикле, является требование к коэффициенту формы резистора $K_{\phi} \geq 0,1$ [5, с. 169]. Однако физическая природа данного ограничения до настоящего времени не нашла достаточного освещения в технической литературе. Дело в том, что при $K_{\phi} < 0,1$ у ТПР прямоугольной формы начинается быстрый рост ширины электродов (ширина электродов совпадает по направлению с шириной резистивного элемента), что увеличивает их сопротивление, причем это сопротивление приводит к заметному увели-

чению общего сопротивления ТПР [6]. Этот вид погрешности относится к методической, т. к. эта погрешность не входит в математическую модель (1) расчета сопротивления ТПР. Изменение сопротивления электродов при изготовлении ТПР носит случайный характер и относится к производственной погрешности [6].

Наиболее просто в модели расчета сопротивления можно учесть те систематические погрешности, которые изменяют тот или иной размер резистора на постоянную величину.

Таким образом, можно учесть все систематические погрешности, за исключением градиентной погрешности ρ по оси Y . Следовательно, математическая модель сопротивления резистора R должна содержать систематические погрешности длины Δl_c и ширины Δb_c , а также сопротивления электродов R_3 ,

$$R = \rho \frac{l + \Delta l_c}{b \pm \Delta b_c} + R_3, \quad (2)$$

где $\Delta l_c, \Delta b_c$ — систематические погрешности длины и ширины резистора из-за процессов фотолитографии и травления.

Следует отметить, что параметр R_3 в формулу (2) включают только при расчете сопротивления ТПР с $K_\phi \leq 0,1$, где происходит быстрый рост сопротивления электродов. В формуле (2) учтено, что при выполнении операций фотолитографии и травления увеличивается длина резистора, а его номинальное сопротивление возрастает за счет сопротивления электродов. Ширина резистора может как уменьшаться (по вышеизложенным причинам), так и увеличиваться. Наиболее распространенными причинами увеличения ширины ТПР являются недопроявление фоторезиста и нечеткость края элементов ФШ.

Проиллюстрируем влияние систематических погрешностей на относительное изменение δR_c номинального значения сопротивления прямоугольного резистора, для чего рассчитаем сопротивления $R1, R2$ по формулам (1) и (2), соответственно, при следующих данных: $\rho=1$ кОм/□; $\Delta l_c=6$ мкм; $\Delta b_c=-3$ мкм.

Пример 1: $l=b=100$ мкм;

$R1=1$ кОм; $R2=(100+6)/(100-3)=1,093$ кОм; $\delta R_c=9,3\%$.

Пример 2: $l=100$ мкм; $b=2000$ мкм; $R_3=1,4$ Ом;

$R1=50$ Ом; $R2=(100+6)/(2000-3)+1,4=54,4$ Ом; $\delta R_c=8,8\%$.

Приведенные примеры показывают, что формула (1) дает существенные погрешности при уменьшении линейных размеров ТПР до 100 мкм и менее, а также не позволяет проектировать ТПР с $K_\phi < 0,1$.

Математическая модель половины поля допуска δR производственной относительной погрешности имеет вид

$$\delta R = \delta \rho_c + \sqrt{\delta \rho^2 + \delta l^2 + \delta b^2 + \delta R_3^2}, \quad (3)$$

где $\delta \rho_c$ — систематическая градиентная погрешность удельного поверхностного сопротивления;

$\delta \rho$ — общая случайная погрешность ρ ;

$\delta l, \delta b$ — случайные погрешности длины и ширины резистора из-за процессов фотолитографии и травления;

ΔR_3 — случайная абсолютная погрешность сопротивления электродов;

$\delta R_3 = \Delta R_3 / R$.

Математическая модель производственной погрешности содержит две основные составляющие: систематическую градиентную погрешность и суммарную случайную погрешность формирования толщины резистивной и проводящей пленки, а также длины и ширины ТПР. Систематическая градиентная погрешность, как это следует из рис. 1, имеет нелинейную зависимость по координате Y , следовательно, ее учет в формуле (2) приведет к усложнению расчета. Поэтому этот вид погрешности целесообразнее ввести в формулу (3). Для того, чтобы общая погрешность резистора имела симметричное поле допуска, необходимо при проектировании платы соответствующим образом выбирать координату Y_0 , где принимается $\delta \rho_c = 0$.

Формирование случайных погрешностей сопротивления ТПР происходит на следующих операциях: напыления резистивного слоя ($\delta \rho$); напыления проводящего слоя (δR_3); проведения первой фотолитографии и травления проводящей пленки (δl); проведения второй фотолитографии и травления резистивной пленки (δb). Эти события независимы друг от друга, поэтому для расчета случайной производственной погрешности может быть применен аппарат теории вероятностей. Как показывают расчеты [6], в случае применения при проектировании МСБ конструкции гребенчатого резистора случайная погрешность формирования электродов не превышает 1%, что намного меньше других составляющих производственной погрешности в формуле (3). Поэтому математическая модель половины поля допуска производственной относительной погрешности принимает более простой вид:

$$\delta R = \delta \rho_c + \sqrt{\delta \rho^2 + \delta l^2 + \delta b^2}.$$

Рассмотрение основных видов погрешностей и их влияния на формирование сопротивления тонкопленочных резисторов показало, что на воспроизводимость ТПР большое влияние оказывают методические погрешности, в связи с чем существующие математические модели расчета сопротивления ТПР нуждаются в уточнении.

Предложенные более точные модели расчета сопротивления ТПР и его погрешности позволяют проектировать ТПР с размерами 10...50 мкм, а также ТПР с $K_\phi < 0,1$, при существующих технологических допусках.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ермолаев Ю. П., Пономарев М. Ф., Крюков Ю. Г. Конструкция и технология микросхем.— М.: Радио и связь, 1980.
2. Гимпельсон В. Д., Радионов Ю. А. Тонкопленочные микросхемы для приборостроения и вычислительной техники.— М.: Машиностроение, 1976.
3. Клименко Б. И., Сидорова И. А. Совершенствование технологии изготовления тонкопленочных резисторов из сплава РС-3710 // Технология авиационного приборостроения.— 1987.— Вып. 3—4.— С. 36—38.
4. Спирин В. Г. Методы определения коэффициента формы тонкопленочных резисторов при проектировании и изготовлении гибридных интегральных схем // Там же.— 1990.— Вып. 2.— С. 66—68.
5. Ефимов И. Е., Козырь И. Я., Горбунов Ю. И. Микроэлектроника.— М.: Высшая школа, 1987.
6. Спирин В. Г. Оценка влияния сопротивления электродов на погрешность тонкопленочного резистора // Вестник Верхне-Волжского отд. АТН РФ. Сер. Высокие технологии в радиоэлектронике и связи.— 2003.— Вып. 1(9).— С. 11—14.

Д. т. н. В. Н. КУЦЕНКО, к. т. н. Т. В. ЛЕВЧЕНКО

Украина, г. Киев, Научно-технический комплекс "Импульс"
E-mail: ntkimpuls@ukr.net

Дата поступления в редакцию
31.07 2003 г. — 11.03 2004 г.

Оппонент д. т. н. В. И. БОРЩ
(ОНАС им. А. С. Попова, г. Одесса)

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ АППАРАТУРА ПЕРЕДАЧИ И ПРИЕМА ДАННЫХ 3-501

Многофункциональная аппаратура работает по различным каналам связи и совместима с ними по способам ввода и вывода информации.

В сетях оперативного управления подразделениями, работающими в условиях экстремальных или чрезвычайных ситуаций, существует необходимость постоянного обмена голосовой и цифровой информацией. Используемые для этих целей существующие семейства оконечных устройств связи (телефонные и телеграфные аппараты, радиостанции, средства космической связи) обладают принципиальными недостатками. Во-первых, каждое семейство работает только по своим каналам связи и не может работать по чужим. Во-вторых, семейства несовместимы по способам ввода и вывода информации.

Актуальной является проблема разработки и серийного производства многофункциональной аппаратуры передачи и приема данных, позволяющей осуществлять голосовую связь, вводить информацию с унифицированного носителя и от других источников, выводить информацию на унифицированный носитель и другие источники, а также работать по телефонным, телеграфным, УКВ-радио-, радиорелейным, тропосферным, космическим, компьютерным каналам связи. Такая аппаратура должна обеспечивать связь при наличии высокого уровня помех и значительных временных задержек в канале [1, с. 8—14].

В НТК „Импульс” разработана многофункциональная аппаратура передачи и приема данных 3-501 [2]. В качестве унифицированного носителя информации была выбрана широко используемая в телеграфной связи пятидорожечная перфокарта шириной 17,4 мм (ОСТ 13-294-86) с размерами, формой и расположением комбинаций отверстий по ГОСТ 10860-83 (код МТК-2). Другими носителями информации могут быть компьютерные файлы, созданные в кодировке ASCII, а также кодограммы и кодовые слова, созданные непосредственно в аппаратуре.

Аппаратура позволяет:

- вводить телеграммы через трансмиттер с перфокарты при возможности контроля;
- вводить и редактировать кодограммы (цифровые последовательности длиной до 10000 знаков) и управляющие кодовые слова (цифровые последовательности длиной до 13 знаков) с клавиатуры;

- осуществлять голосовую связь по двухпроводной или четырехпроводной телефонной линии при отсутствии (режим центральной батареи, ЦБ) и наличии (режим местной батареи, МБ) дополнительного сигнала вызова, а также по коммутированному телефонному каналу через АТС;

- производить ввод и вывод цифровой информации с персонального компьютера типа IBM PC через последовательный порт RS-232;

- производить прием и передачу цифровой информации по двухпроводной или четырехпроводной телефонной линии в режимах ЦБ или МБ, а также по коммутированному телефонному каналу, УКВ-радиоканалу, каналу космической связи через стык С-ИИ с защитой от ошибок или без таковой;

- перенаправлять принятые телеграммы и кодограммы по другим каналам связи;

- осуществлять вывод телеграммы и кодограммы на перфокарты;

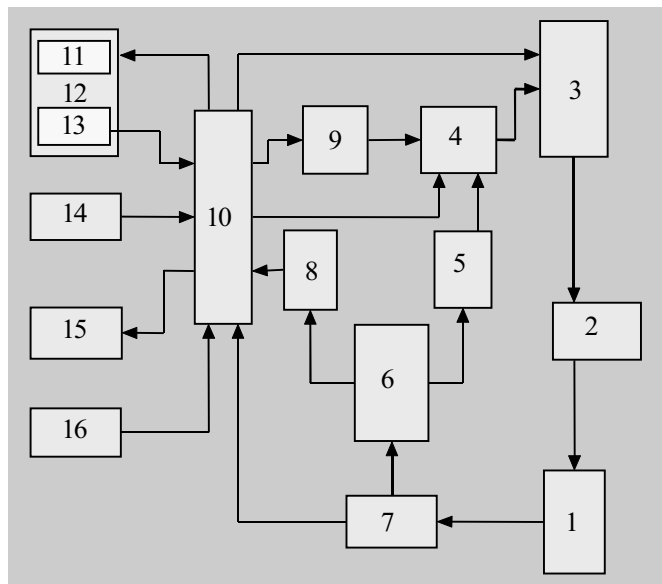
- выводить кодограмму и управляющее кодовое слово на индикатор;

- автоматически тестировать составляющие блоки.

На рисунке представлена функциональная блок-схема аппаратуры 3-501.

В телефонных каналах передающий и приемный комплекты аппаратуры при включенной защите от ошибок работают следующим образом.

С трансмиттера 14 передающего комплекта данные с перфокарты вводятся через коммутатор 10 в блок памяти данных для передачи 9. Ввод данных может также осуществляться с помощью



клавиатуры блока управления 16 либо через порт RS-232 (не показан) от персонального компьютера. С помощью блока управления 16 коммутатор 10 соединяет микрофон 13 и телефон 11 телефонной трубки 12 передающего комплекта через передатчик 3 и канал 2 с приемником 1 и блоком распознавания 7 приемного комплекта. Блок распознавания 7 определяет наличие телефонного вызова и через коммутатор 10 приемного комплекта соединяет первый выход блока распознавания 7 с микрофоном 13 и телефонной трубки 12 приемного комплекта.

После установления голосовой связи через блок управления 16 и коммутатор 10 блок распознавания 7 приемного комплекта переходит в режим приема данных. Передающий комплект через блок управления 16 соединяет третий выход коммутатора с третьим входом блока 4, который через первый вход считывает данные с выхода блока памяти данных для передачи 9 и формирует пакеты данных для передачи. Через второй вход передатчик 3 передает пакеты данных в канал связи 2.

Из канала связи 2 данные поступают через приемник 1 и второй выход блока распознавания 7 приемного комплекта в блок восстановления принятых данных 6.

В случае, когда принятый пакет данных может быть восстановлен, блок контроля сбоя 5 приемного комплекта выдает массив данных с сообщением о продолжении приема. Этот массив через блок формирования пакетов 4 и передатчик 3 приемного комплекта поступает в канал связи 2. Принятый пакет данных сохраняется в блоке памяти принятых данных 8. Из канала связи 2 пакет данных с сообщением поступает через приемник 1 и второй выход блока распознавания 7 передающего комплекта в блок восстановления принятых данных 6, откуда через блок контроля сбоя 5 в блок 4 передается сигнал о формировании следующего пакета данных для передачи.

В случае, когда принятый пакет данных не может быть восстановлен, блок контроля сбоя 5 приемного комплекта выдает массив данных с сообщением о повторении передачи принятого пакета. Этот массив через блок формирования пакетов 4 и передатчик 3 приемного комплекта поступает в канал связи 2. Из канала связи 2 пакет данных с сообщением поступает через приемник 1 и второй выход блока распознавания 7 передающего комплекта в блок восстановления принятых данных 6, откуда через блок контроля сбоя 5 в блок 4 передается сигнал о передаче предыдущего пакета данных. Такой обмен осуществляется до тех пор, пока принятый пакет данных не будет восстановлен.

После приема последнего пакета данные из блока 8 приемного комплекта через четвертый вход, четвертый выход коммутатора 10 и перфоратор 15 могут быть выведены на перфоленту либо на индикатор блока управления 16. Через порт RS-232 данные могут быть выведены также в персональный компьютер. Коммутатор 10 соединяет микрофон 13 и телефон 11 телефонной трубки 12 передающего комплекта через передатчик 3 и канал 2 с приемником 1 и блоком распознавания 7 приемного комплекта. После этого обмен данными может быть продолжен или завершен.

Примененная система защиты от помех позволяет при работе по проводному каналу добиться коэффициента ошибок не более 10^{-4} при соотношении сигнал/шум не менее 28 дБ. Возможность отключения защиты от ошибок может быть использована либо для каналов с низким отношением сигнал/шум, в которых нецелесообразно применение процедур восстановления информации, либо в очень зашумленных каналах, где обратная связь может быть нарушена. В последнем случае аппаратура сообщает количество неправильно принятых пакетов.

При работе по радиоканалу или по каналу космической связи аппаратура обеспечивает только обмен данными без защиты от помех. Поддержка голосовой связи должна осуществляться дополнительными средствами.

В конструкцию аппаратуры входят:

- корпус, в котором установлены ложемент для укладки телефонной трубки и кассетница для хранения перфоленты;
- пульт управления, который реализован на 16 клавишах управления и жидкокристаллическом буквенно-цифровом индикаторе;
- микропроцессорная плата на основе микропроцессора 8188, в которой на микропрограммном уровне реализовано большинство функциональных блоков аппаратуры и стык RS-232 с персональным компьютером;
- специализированное устройство последовательной связи на базе сигнального процессора ADSP-2181, которое позволяет подключаться к различным каналам связи;
- трансмиттер, предназначенный для ручного либо механического ввода данных с перфоленты;
- перфоратор, предназначенный для вывода данных на перфоленту;
- модуль управления трансмиттером и перфоратором, реализованный на микроконтроллере 8051.

В аппаратуре используется импульсный источник вторичного питания и стандартная телефонная трубка.

Аппаратура имеет следующие характеристики:

- объем вводимой (переданной, принятой) информации в одном буфере — 10000 знаков;
- количество буферов передачи и приема телеграмм, соответственно — 10;
- количество буферов передачи и приема кодограмм, соответственно — 4;
- скорость ввода перфоленты — 92 знака в секунду;
- скорость перфорирования — 19 знаков в секунду;
- скорость в канале передачи — до 1200 бит/с в проводных и радиоканалах, до 7200 бит/с в каналах космической связи;
- допустимое время пропадания несущей частоты в канале — до 300 мс;
- возможность обмена информацией с включенной либо отключенной аппаратно-программной защитой от ошибок;
- питание — переменное напряжение 220 В или постоянное 27 В;
- хранение информации при выключенном питании — до 7 суток;
- потребляемая мощность — не больше 50 Вт;
- срок службы — 10 лет (гарантия 3 года);
- наработка на отказ — 7000 часов.

Габаритные размеры изделия 420×337×160 мм (в упаковке — 540×458×240 мм), масса не более 13,3 кг (в упаковке — 28 кг).

Аппаратура 3-501 может быть составной частью передвижных и стационарных комплексов связи, которые используются в условиях, например, чрезвычайных ситуаций.

Предполагается дальнейшее совершенствование аппаратуры с использованием электронных источников информации.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Протоколы и методы управления в сетях передачи данных.— М.: Радио и связь, 1985.
2. Заявка 2003065152 України. Багатофункціональний пристрій передачі та прийому даних по телефонних і радіотелефонних каналах зв'язку / В. Н. Куценко, Т. В. Левченко.— Позитивне рішення від. 29.12.2003.

С. В. ДУБЕЦ, Е. Н. ФЕДОРЧЕНКО, В. И. КУЗЬМИНОВ

Украина, г. Запорожье, НПП «Хартрон-ЮКОМ», НПП «Логикон»
E-mail: eaglets1@mail.ru

Дата поступления в редакцию
10.11 2003 г.

СИСТЕМА ЛИНЕЙНОЙ ТЕЛЕМЕХАНИКИ «ХОРТИЦА-М» ДЛЯ ГАЗОПРОВОДОВ

Рассмотрены результаты модернизации ранее разработанной системы линейной телемеханики «Хортица» для магистральных газопроводов.

Действующие на некоторых газопроводах системы диспетчерского и автоматического управления газоснабжения создавались в основном в 1980-х годах. Эти системы, построенные на базе морально и физически устаревших (и, как правило, снятых с производства) устройств, не отвечают современным требованиям по режимам функционирования и возможным видам представления информации. Обычно развитие подобных систем влечет за собой замену технических средств и программного обеспечения [1].

Анализ существующих СЛТМ — систем линейной телемеханики "Хортица" (Украина), СЛТМ-СК (Россия), ММГ-СК (Венгрия), "Суперфлоу" (США), "Томсон" (Франция), а также опыт эксплуатации СЛТМ «Хортица» [2] на магистральных газопроводах РАО «Газпром» и ПО «Укргазпром», послужили основой для модернизации системы "Хортица".

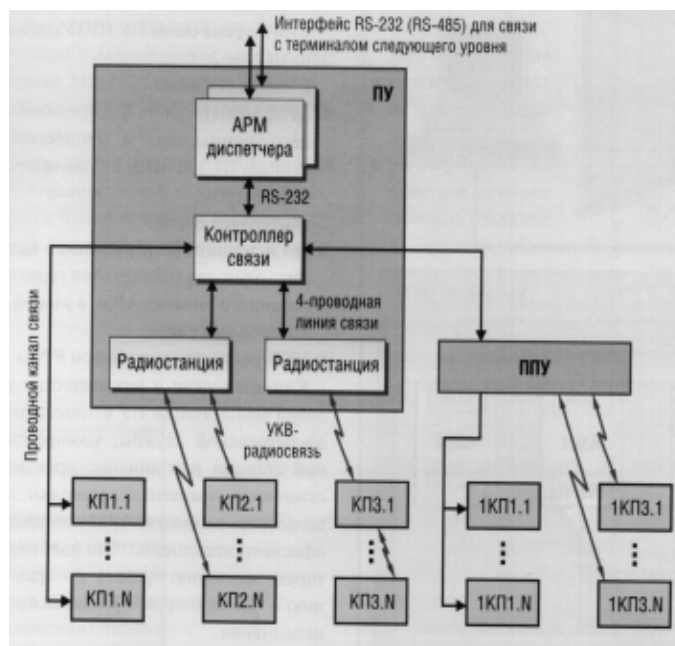
Модернизированная система «Хортица-М» состоит из программно-технических средств пункта управления (ПУ), промежуточных пунктов управления (ППУ) и контролируемых пунктов (КП). Для организации взаимодействия ПУ, ППУ и КП в системе используются следующие каналы связи:

- физическая 4-проводная линия связи с усилителями НЧ;
- выделенный 4-проводный канал тональной частоты в соответствии с ГОСТ 25007—81;
- радиоканал;
- последовательные интерфейсы RS-232 (RS-485) для обмена с терминалом информационно-измерительной системы верхнего уровня.

Вариант структурной схемы системы с одним ППУ и комбинированным сочетанием каналов связи показан на **рисунке**.

Модернизация была направлена на улучшение показателей и характеристик системы, а именно:

- 1) расширились функциональные возможности (к функциям линейного КП добавились функции вычислителя объема и расхода газа);
- 2) в 20 раз уменьшились габаритно-массовые показатели (20 кг вместо 400 кг);



- 3) в 5 раз улучшились метрологические характеристики (основная приведенная погрешность при телеизмерении составляет не более 0,1% вместо 0,5%);
- 4) в 20 раз снизилось энергопотребление (10 Вт вместо 200 Вт);
- 5) в 5 раз увеличались показания надежности (наработка на отказ 60000 часов вместо 12000 часов).

Модернизированный КП (вычислитель объема газа) прошел полный цикл государственных приемочных и контрольных испытаний, был внесен в Государственный реестр измерительной техники, имеет Сертификат утверждения и Сертификат соответствия.

Сравнительный анализ систем показал, что «Хортица-М» по своим техническим и стоимостным характеристикам не уступает зарубежным аналогам, а по некоторым параметрам, таким как время реакции, погрешность измерения, средняя наработка на отказ, превосходит их при меньшей себестоимости.

Используемая в контролируемых пунктах элементная база позволяет решить весь спектр задач контроля и управления объектами, включая вычисление объемов газа. К примеру, КП214, который установлен на газораспределительной станции, обеспечивающей подачу газа на Новочеркасскую ГРЭС, контролирует 41 параметр, управляет двумя установками катодной защиты и охранным краном, а также вычисляет объем газа по шести трубопроводам. При

этом обеспечивается общая экономия затрат по сравнению с такими вычислителями, как, например, "Суперфлоу", в 2 раза, а в целом, с учетом функций линейного КП, — в 3 раза.

Кроме того, СЛТМ «Хортица-М» от других систем отличается следующее:

— В отличие от многих известных распределенных систем управления с периодическим циклическим опросом устройствами верхнего уровня устройств нижнего, в системе «Хортица-М» нижний уровень (КП) является активным. Это в значительной степени повышает оперативность в обнаружении нештатных и аварийных ситуаций и изменений технологических параметров, особенно при большом количестве КП. При этом избежать конфликтных ситуаций в каналах связи с множественным доступом помогают программно-технические возможности адаптеров связи.

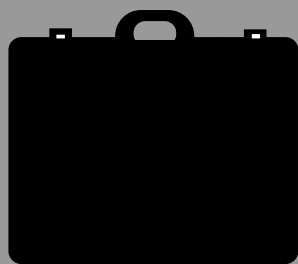
— Конфигурирование контролируемого пункта для конкретного объекта с помощью паспортов параметров, подготавливаемых обслуживающим персоналом и загружаемых из пункта управления, позволяет оперативно адаптировать программно-технические средства КП к любым технологическим объектам без перепрограммирования. Это придает системе «Хортица-М» универсальные свойства для использования ее при автоматизации любых систем и объектов трубопроводного транспорта.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Стуров В. А. Разработка и производство нефтепромыслового оборудования // Нефтегазовые технологии.— 1998.— № 3.— С. 17—22.
2. Романовский А. В., Гриненко А. В., Солодовников Г. Г., Кузьмин В. И. Система "Хортица" для трубопроводного транспорта // Современные технологии автоматизации.— 2002.— № 2.— С. 42—48.

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

- Математическая модель технологического процесса по выборкам малого объема. *Ю. А. Долгов, А. Ю. Долгов* (Молдова, г. Тирасполь)
- Реализация элементов цифрового быстродействующего фильтра на ПЛИС. *В. П. Малахов, В. С. Ситников, П. В. Ядвичук* (Украина, г. Одесса)
- Механизм возникновения шумовых максимумов в элементах с нелинейными вольт-амперными характеристиками. *А. Г. Головка* (Украина, г. Херсон)
- Оптимизация геометрических характеристик $p-n$ -структур для оптоэлектроники. *И. М. Викулин, В. И. Ирха, Б. В. Коробицын, В. Э. Горбачев* (Украина, г. Одесса)
- Способы компенсации систематических погрешностей тонкопленочных элементов. *В. Г. Спириин* (Россия, г. Арзамас)
- О возможности уменьшения температуры отжига радиационных дефектов в кристаллах Ge с помощью ультразвука. *Я. М. Олих, И. А. Лисюк, Н. Д. Тимочко* (Украина, г. Киев)
- Оптимизация конструкции и технологии изготовления диодов Ганна для КВЧ-терапии. *В. Н. Иванов, В. М. Ковтонюк, Н. С. Раевская* (Украина, г. Киев)
- Мостовые магниточувствительные сенсоры. *Л. Ф. Викулина, В. А. Мингалев* (Украина, г. Одесса)
- Ультрафиолетовый радиометр диапазона 300÷400 нм. *А. А. Ащеулов, В. К. Бутенко, И. В. Докторович, А. Х. Дунаенко, В. Д. Фотий* (Украина, г. Черновцы)
- Интегральные преобразователи давления с частотным выходом на основе кремниевых однопереходных транзисторов. *Г. Г. Бабичев, Г. И. Гаврилюк, Э. А. Зинченко, С. И. Козловский, В. А. Романов, Н. Н. Шаран* (Украина, г. Винница; г. Киев)
- Устройство охлаждения элементов микроэлектронной аппаратуры. *А. А. Ащеулов, В. Г. Охрем, Е. А. Охрем* (Украина, г. Черновцы)
- Микронегатронный преобразователь давления на основе МОП-структуры. *А. М. Гасанов, Ф. Д. Касимов, А. Э. Лютфалибекова* (Азербайджан, г. Баку)
- Интегрированный метод принятия решений о структуре технологических процессов изготовления деталей приборов. *Н. А. Алексеев* (Украина, г. Киев)
- Устройства на основе фотонных кристаллов. *Е. А. Нелин* (Украина, г. Киев)
- Некоторые аспекты применения силовой микросхемы при построении мощных инверторов. *Г. И. Гаврилюк, А. П. Бакалюк, В. В. Севастьянов, В. В. Чечель* (Украина, г. Винница)
- Моделирование анизотропии теплопроводности медных пластинчатых радиаторов на основе метода электротепловой аналогии. *В. В. Усов, Н. М. Шкатуляк* (Украина, г. Одесса)
- Электромагнитные помехи УВЧ-усилителя мощности. *В. Г. Кудря* (Украина, г. Одесса)
- Фотоэлектрические анализаторы поляризованного излучения на основе полупроводниковых гетероструктур оксид-InSe (GaSe). *З. Д. Ковалюк, В. Н. Катеринчук* (Украина, г. Черновцы)



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

А. М. АХИЕЗЕР

Украина, Одесская государственная академия холода
E-mail: oniitt@te.net.ua

Дата поступления в редакцию
12.12 2003 г.

Оппонент В. А. Иванов
(НИИ "Шторм", г. Одесса)

МАЛОГАБАРИТНЫЙ СТАЦИОНАРНЫЙ ПИРОМЕТР С ПОВЫШЕННЫМ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Термостабилизация оптической части пирометра, калибровка и применение движущегося датчика позволяют на 50% повысить его температурную разрешающую способность.

Исследование тепловых полей нагретых объектов по их инфракрасному (ИК) излучению существенно отличается от контактных способов измерений. Последние требуют осуществления надежного контакта с исследуемым объектом и дают информацию о температуре только в точке контакта. При измерениях температуры объектов, размеры которых соизмеримы с размерами термодатчика, вносится большая погрешность. В случае же исследования тепловых полей очень малых объектов (например, изделий микроэлектроники) контактные измерения становятся невозможными.

Этих недостатков лишены неконтактные ИК-методы, осуществляемые с помощью пирометров (радиометров).

Инфракрасные пирометры имеют широкий спектр применения [1, 2]:

— для неконтактного измерения температуры промышленных объектов (режущего инструмента, прокатываемого металла, тормозных прокладок и т. д.), контроля исправности электротехнического оборудования, контроля изделий, для испытания эффективности теплоизоляции;

— в измерительной технике для применения в радиометрических комплексах (для восстановления глубинного профиля распределения температуры);

— в электронной промышленности для измерения температурного распределения на кристалле больших интегральных схем, контроля качества биполярных элементов, МОП-схем, СВЧ-транзисторов и др.;

— в медицинских целях для неконтактного измерения температуры кожи, исследования температурных ощущений, ранней диагностики рака, контроля за заживлением ран без снятия повязки, ранней диагностики предынфарктного состояния, выявления сосудистых поражений мозга, исследования закупорки вен и варикоза вен.

Основная масса существующих на сегодняшний день систем бесконтактного измерения температуры предназначена для измерения высоких температур, более 500 К, при этом температурное разрешение таких систем составляет от 1 до 0,1 К. В то же время для медицинских задач, где максимальное измеряемое изменение температуры составляет от 0,1 до 3 К, температурного разрешения в 1—0,1 К явно недостаточно. В связи с уменьшением потребляемой мощности микросхем аналогичная ситуация складывается с измерением температурного распределения на кристалле больших интегральных схем (БИС) и теплового распре-

деления в электронных узлах. Современные радиометрические комплексы для восстановления глубинного профиля распределения температуры также требуют больших точностей работающих в их составе систем бесконтактного измерения температуры.

В работе предлагается один из вариантов реализации пирометра с температурным разрешением 0,03 К. Функциональная схема пирометра изображена на рисунке.

В качестве приемника теплового излучения предлагается использовать пироэлектрический приемный элемент (пироэлектрик). Особенность пироэлектрических кристаллов заключается в спонтанной поляризации при отсутствии внешних электрических полей. Обнаружить поляризацию пирокристаллов можно только при измерении температуры на гранях кристалла, перпендикулярных к полярной оси [3, с. 5].

Следует отметить, что пироэлектрический ток — сложная функция физических характеристик кристалла, его геометрических размеров и условий теплообмена со средой. Значение тока зависит от двух основных факторов — среднего прироста температуры приемного элемента и скорости изменения прироста температуры. Равномерность частотной характеристики пироэлектрического кристалла нарушается при очень низких частотах, когда тепловые волны, пройдя приемный элемент, достигают подложки, и при слишком больших частотах, когда они не достигают пироактивного кристалла [1, с. 33].

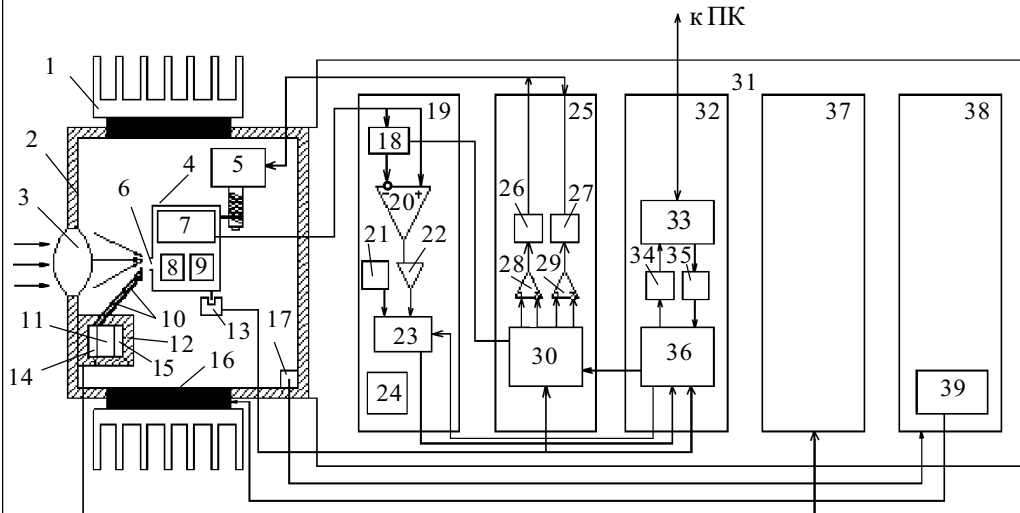
Чувствительность пироэлектрика должна приходиться на максимум спектра излучения абсолютно черного тела. Этот максимум смещается с увеличением температуры в сторону более коротких длин волн. Уравнение вычисления этой длины волны является одним из выражений закона смещения Вина [4, с. 36]:

$$\lambda_{\text{макс}} T = C_3, \quad (1)$$

где C_3 — постоянная закона смещения Вина, равная $2,8978 \cdot 10^{-3}$ м·К.

Из закона смещения Вина можно определить, что для измерения температур в диапазоне 300—350 К датчик должен быть чувствителен к длине волны, на которую приходится максимальное излучение, т. е. 8—12 мкм (дальнее ИК-излучение). Необходимо определить также долю полусферической интегральной поверхностной плотности потока излучения $F_{\lambda_1-\lambda_2}$, испускаемую в полосе спектра 8—12 мкм.

$$F_{\lambda_1-\lambda_2} = F_{0-\lambda_2 T} - F_{0-\lambda_1 T}. \quad (2)$$



Функциональная схема пирометра:

1 — теплоотводящие радиаторы; 2 — теплоизолированный экранированный корпус; 3 — ИК-линза из КРС-5; 4 — экранированный корпус; 5 — шаговый электродвигатель; 6 — диафрагма; 7, 20 — прецизионный предварительный операционный усилитель (ОУ); 8 — пироэлектрический приемник; 9 — источник стабильного тока; 10 — световоды из КРС-5; 11 — термостат; 12 — теплоизоляция; 13 — оптопара; 14 — датчик температуры, совмещенный с источником стабильного

тока; 15 — нагревательный элемент; 16 — холодильные элементы (элементы Пельтье); 17 — датчик температуры корпуса; 18 — устройство выборки хранения (УВХ); 19 — аналоговый модуль обработки сигналов; 21 — высокоточный источник опорного напряжения; 22 — согласующий ОУ; 23 — аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 24 — преобразователь/фильтр аналоговых питающих напряжений; 25 — модуль управления двигателем и синхронизацией; 26, 27 — усилитель мощности; 28, 29 — ОУ; 30, 36 — управляющий микроконтроллер; 31 — кросс-плата; 32 — модуль цифровой обработки сигналов; 33 — интерфейс порта RS-232; 34, 35 — оптоэлектронные развязки; 37 — модуль высокоточного термостата; 38 — модуль термостата корпуса; 39 — усилитель мощности

Значения $F_{0-\lambda T}$ приведены в справочных таблицах [5]. В нашем случае $F_{0-\lambda 2T} = 0,428$ (310 К, 12 мкм), $F_{0-\lambda 1T} = 0,161$. Следовательно, в ИК-приемник, чувствительный в диапазоне 8—12 мкм, попадет $(0,428 - 0,161) \cdot 100\% = 26,7\%$ интенсивности всего излучения.

Существует два основных вида фокусирующих систем для диапазона дальнего ИК-излучения — линзовые и зеркальные. Зеркальные системы имеют меньший коэффициент поглощения принимаемого излучения, однако, по сравнению с линзовыми, имеют больший кружок рассеяния [2, с. 171] и предпочтительны только для невысоких геометрических разрешений. В линзовых системах удается достичь лучшего качества фокусирования, однако линзовые системы имеют больший коэффициент поглощения.

В качестве фокусирующей системы предлагается использовать линзу из материала КРС-5, т. к. для исследования распределения тепла на кристалле БИС или (в медицинских целях) для исследования тепловых распределений и акупунктурных точек необходимо высокое геометрическое разрешение при небольших расстояниях до исследуемого объекта. В этом случае линзовая система фокусирования ИК-излучения является предпочтительнее [2]. Для уменьшения коэффициента поглощения линзовой фокусирующей системы в качестве объектива используется только одна линза с фокусным расстоянием 40 мм. Для обеспечения модуляции входного излучения не используется световод (который еще больше увеличил бы коэффициент поглощения входного излучения), а применяется устройство, которое передвигает приемник от зоны входного к зоне опорного излучения и обратно.

Основной преградой для увеличения температурного разрешения (пороговой чувствительности) являются шумы. В электронной аппаратуре, в том числе и в пирометрах, в сигнале присутствует большое число различных шумов:

— тепловой шум полупроводника, который наблюдается при отсутствии тока через полупроводник. Источником тепловых шумов является сопротивление в транзисторе. Природа тепловых шумов связана с хаотическим тепловым движением электронов в объ-

ме полупроводника. Спектр такого шума равномерен до СВЧ. Средняя мощность тепловых шумов определяется формулой Найквиста [6, с. 410]:

$$P_{ш} = kT \cdot df, \quad (3)$$

где k — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура;

df — полоса частот;

— дробовой шум в полупроводниковых приборах с $p-n$ -переходом возникает на каждом из переходов в результате флуктуаций тока из-за непостоянства числа носителей, проходящих через переход при подаче на него прямого или обратного напряжения;

— избыточные шумы обусловлены поверхностными явлениями в полупроводниковых приборах и имеют шумовую мощность, обратно пропорциональную частоте, поэтому их иногда называют шумами типа $1/f$;

— фоновый тепловой шум ИК-системы, связанный с тем, что, помимо ИК-излучения от исследуемого объекта, в пироэлектрик попадают также излучения от стенок корпуса, от соседних деталей и пр.

С целью уменьшения влияния фонового и теплового шума предварительный прецизионный операционный усилитель, источник стабильного тока и сам пироэлектрический приемник излучения помещаются в экранированный корпус, который термостабилизируется при нижнем значении рабочей температуры пирометра $+15^\circ\text{C}$, что на практике позволяет достичь в 1,3—1,5 раза меньшего уровня фонового и теплового шума, по сравнению с нестабилизированным, в рабочем диапазоне температур $+15 \dots +30^\circ\text{C}$.

Для уменьшения влияния остальных типов шумов, представляющих собой белый шум, в пирометре используется линейная статистическая фильтрация.

Для обеспечения минимальной погрешности измерения применяется опорный источник ИК-излучения — термостат и два световода различного диаметра, передающие две разные мощности ИК-излучения, используемые для привязки по двум уровням измеряемой мощности.

Пирометр выполнен в виде двух разделенных экранированных камер, одна из которых теплоизолирована от внешней среды. В ней находится оптическая часть пирометра. Во второй камере к основа-

нию прикреплена кросс-плата, обеспечивающая связь между электронными модулями пирометра. Модули являются съемными и могут размещаться на кросс-плате в произвольном порядке.

На кросс-плате находятся:

1. Аналоговый модуль обработки сигналов, предназначенный для вычитания из входного сигнала статического уровня, усиления сигнала и его преобразования в 16-разрядный последовательный код.

2. Модуль управления двигателем и синхронизацией, предназначенный для синхронизации работы всех узлов пирометра с выдачей управляющих сигналов на аналоговый модуль обработки сигналов и шаговый электродвигатель, а также обеспечивающий выдачу информационных данных в модуль цифровой обработки сигналов.

3. Модуль цифровой обработки сигналов, предназначенный для управления АЦП аналогового модуля обработки сигналов, предварительной обработки цифровых данных, оптоэлектронной развязки от цепей персонального компьютера (ПК), выдачу цифровых данных в необходимом виде в ПК.

4. Модуль термостата, предназначенного для термостабилизации опорного источника излучения при отклонении температуры не более чем на $0,01^{\circ}\text{C}$.

5. Модуль термостата корпуса, предназначенный для термостабилизации корпуса с отклонением температуры не более чем на $0,1^{\circ}\text{C}$.

Модули 2—5 выполнены на микроконтроллерах AVR фирмы Atmel. Модуль 1 полностью экранирован медным корпусом с толщиной стенки 1 мм.

Принцип работы пирометра следующий:

1. Излучение от исследуемого объекта попадает на линзу 3. Линза фокусирует изображение в плоскости пироэлектрика через диафрагму 6 диаметром 0,8 мм, что обеспечивает высокое геометрическое разрешение.

3. Пироэлектрик 8 преобразует ИК-излучение в электрический сигнал, используя при этом источник тока.

4. Сигнал с пироэлектрика усиливается прецизионным предварительным усилителем 7 в 20 раз и передается по гибкому экранированному кабелю в аналоговый модуль обработки сигналов 19. Амплитуда входного сигнала при этом составляет 5 мВ, а смещение сигнала относительно уровня общего может составлять от -5 до $+5$ В в зависимости от температуры пироэлектрического приемника.

5. Модуль управления двигателем и синхронизацией формирует управляющие импульсы, синхронизирующие все узлы пирометра. Вначале подаются импульсы на шаговый электродвигатель 5, который перемещает пироэлектрик в экранированном корпусе в положение приема опорного ИК-излучения и задерживается там на время установления статического режима пироэлектрика (порядка 400 мс), при котором выходной сигнал соответствует относительно 0-му уровню.

6. Затем модуль управления двигателем и синхронизацией формирует сигнал выборки, поступающий на УВХ 18. Это необходимо для того, чтобы выгнать постоянную составляющую входного сигнала, что и происходит на ОУ 20.

7. Модуль управления двигателем и синхронизацией подает импульсы на шаговый электродвигатель 5, который перемещает пироэлектрик в область приема излучения от исследуемого объекта и останавливается в этом положении на 200 мс.

8. Сигнал с вычитенной постоянной составляющей из ОУ 20 поступает в ОУ 22, где усиливается до амплитуды 10 В, необходимой для работы АЦП 23.

9. АЦП с использованием источника прецизионного опорного напряжения $+5$ В и входного сигнала формирует 16-разрядный последовательный цифровой код под управлением микроконтроллера 36.

10. Микроконтроллер формирует управляющие сигналы для АЦП и принимает из него 16-разрядный цифровой последовательный код, который предварительно обрабатывается, замешивается с синхрокодами и через оптронную развязку 34 передает данные в ПК через интерфейсный приемо-передатчик последовательного порта RS-232 33.

11. Модуль управления двигателем и синхронизацией попеременно чередует режим измерения с режимом калибровки. В режиме калибровки пироэлектрик перемещается от опорного источника ИК-излучения ко второму опорному источнику.

12. Стабилизация температуры опорного источника излучения обеспечивается модулем термостата, построенного на микропроцессорной системе, обеспечивая стабилизацию температуры в пределах $0,01^{\circ}\text{C}$. Абсолютная температура опорного источника излучения выставляется равной $40\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

13. Температурную стабильность корпуса обеспечивает модуль термостата корпуса, построенный по схеме, аналогичной модулю термостата, однако с меньшей стабилизацией температуры, составляющей $0,1^{\circ}\text{C}$. Абсолютная температура стабилизации корпуса выставляется равной $15\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Охлаждение корпуса происходит при помощи последовательно соединенных элементов Пельтье. Так как они потребляют большую мощность (порядка 5 Вт при токе 1 А), для управления ими используется усилитель мощности, совмещенный с импульсным преобразователем напряжения.

При включении пирометра производятся следующие действия:

1. Модуль управления двигателем и синхронизацией производит калибровку положения пироэлектрического приемника при помощи оптопары.

2. Корпусной термостат и термостат опорного источника излучения производят калибровку нагревателя и охладителей (элементов Пельтье), после чего начинается выход термостатов на рабочий режим.

3. Модуль цифровой обработки сигналов контролирует установление режима работы пирометра и посылает соответствующую информацию в персональный компьютер.

4. После выхода на рабочий режим термостатов пирометр переходит в режим измерений.

5. В режиме измерений пирометр проводит такт калибровки по двум значениям опорного излучения, необходимой для корректировки последующего измерения с учетом теплового состояния пироэлектрического приемника излучения.

6. После калибровки производится замер выходного излучения относительно опорного источника излучения.

7. Полученные данные обрабатываются модулем цифровой обработки сигналов и передаются в ПК, где выводятся на экран или сохраняются в файле для дальнейшего анализа.

Построенный по такому принципу пирометр обеспечил получение температурного разрешения в $0,03$ К (уровень шумов, приведенный к выходным данным температуры, составил менее $0,03$ К) при габаритных размерах $180\times 150\times 100$ мм и массе менее 1 кг.

Таким образом, использование в качестве объектива только одной линзы, в качестве модулятора входного излучения — перемещающегося приемника, а также применение термостабилизации оптической части пирометра при пониженной температуре позволяют на 50% повысить температурную разрешающую способность.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кременчутский Л. С., Ройцина О. В. Пироэлектрические приемные устройства.— К.: Наукова думка, 1982.
2. Левитин И. Б. Применение инфракрасной техники в народном хозяйстве.— Л.: Энергоиздат, 1981.
3. Новик В. К., Гаврилова Н. Д., Фельдман Н. Б. Пироэлектрические преобразователи.— М.: Сов. радио, 1979.
4. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением.— М.: Мир, 1975.
5. Латышев Л. Н., Петров В. А., Чеховской В. Я., Шестаков Е. Н. Излучательные свойства твердых материалов. Справочник.— М.: Энергия, 1974.
6. Фолкенберри Л. Применение операционных усилителей и линейных ИС.— М.: Мир, 1985.

К. т. н. И. Л. МИХЕЕВА, В. К. КУРИННЫЙ, В. Ю. ТАЯКИН,
Л. Д. МАЗЫРА

Украина, г. Киев, УкрНИИ аналитического приборостроения
E-mail: mil@ukranalyt.com.ua

Дата поступления в редакцию
13.10 2003 г. — 22.03 2004 г.

Оппонент В. Ю. САВЕЛЬЕВ
(НПП "Поле", г. Н.-Новгород)

АНАЛИЗ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СХЕМ АВТОМАТИЧЕСКИХ ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ГАЗОАНАЛИЗАТОРОВ ОКСИДОВ АЗОТА И ОЗОНА

Рассмотрены особенности построения измерительных схем хемилюминесцентных газоанализаторов для контроля атмосферного воздуха, отработавших газов автомобилей, выбросов промышленных предприятий.

Хемилюминесцентный (ХЛ) метод газового анализа используется для измерения содержания оксида и диоксида азота в атмосферном воздухе, в отработавших газах автомобилей, в выбросах промышленных предприятий. Метод нашел широкое практическое применение благодаря своей высокой чувствительности и селективности. Порог чувствительности ХЛ-газоанализаторов оксидов азота 10^{-3} — 10^{-4} млн⁻¹. В то же время ХЛ-метод позволяет создать газоанализаторы (ГА) для измерения достаточно высоких концентраций (10^4 млн⁻¹) оксидов азота.

У нас в стране и за рубежом, в частности, такими фирмами как Horiba (Япония), Environnement S. A. (Франция), Monitor Labs (США), Patfish Instruments (ФРГ), Riken Keiki (Япония), Thermo Electron Corporation (США), MLU (Австрия), разработана широкая гамма специализированных ХЛ-газоанализаторов для контроля оксидов азота в атмосферном воздухе, в выхлопных газах автомобилей и газотурбинных установок, в отходящих газах ТЭЦ и других промышленных предприятий [1, 2].

Существует большое разнообразие технических реализаций измерительных схем ХЛ-газоанализаторов.

Основным узлом ХЛ-газоанализаторов является детектор, содержащий проточную реакционную камеру, в которой происходит преобразование химической энергии в квантовую. Эффективность такого преобразования определяется, в основном, квантово-механическими параметрами взаимодействующих молекул. Однако на величину интенсивности ХЛ-испускания оказывают влияние и конструктивные особенности детектора (давление, температура, расходы газовых потоков, соотношение концентраций анализируемого компонента и газа-реагента). Технические характеристики ХЛ ГА во многом определяются измерительной схемой прибора.

На рис. 1, а представлена наиболее простая схема непосредственного отсчета хемилюминесцентного газоанализатора для определения оксида азота.

Анализируемый воздух, содержащий оксид азота, через входной газопровод поступает в реакционную камеру 2. В реакционной камере оксид азота взаимодействует с озоном, поступающим от генератора озона 1. Хемилюминесцентное испускание через оптический светофильтр 3 поступает на ФЭУ 4, где преобразуется в электрический сигнал. Сигнал с ФЭУ, пропорциональный концентрации оксида азота, усиливается в усилителе 5, обрабатывается по специальному алгоритму и регистрируется в блоке 6.

Поскольку в анализируемой смеси часто, помимо оксида азота, присутствует диоксид азота, то в большинстве хемилюминесцентных газоанализаторов предусмотрена возможность измерения обоих оксидов путем конверсии NO_2 в NO . На рис. 1, б представлена схема непосредственного отсчета хемилюминесцентного газоанализатора для определения оксида и диоксида азота.

В схему хемилюминесцентного газоанализатора введен дополнительный газовый канал с установленным в нем термокаталитическим конвертером 7, задачей которого является преобразование NO_2 в NO . Основной и дополнительный газовые каналы соединены с реакционной камерой через двухходовой электропневматический клапан 8. Анализируемая газовая смесь, содержащая NO и NO_2 , попеременно подается через клапан в реакционную камеру. В одном случае сигнал с ФЭУ будет пропорционален только концентрации NO , а в другом — концентрации NO_x , т. е. суммарной концентрации NO и NO_2 . По разности этих показаний можно судить о концентрации NO_2 .

Недостатком такого способа является задержка во времени между каждым измерением NO и NO_x — обычно около 1 мин. При измерении концентрации NO_2 по разности показаний NO_x и NO газоанализатор, в действительности, сравнивает концентрации NO и NO_x , имевшие место за одну минуту до этого. При быстром изменении концентрации NO и NO_2 эта погрешность временного смещения будет весьма существенной. Для устранения этого недостатка разработана двухканальная схема хемилюминесцентного газоанализатора с двумя реакционными камерами (рис. 1, в).

Анализируемый газ поступает в прибор через входной газопровод, где газовый поток разделяется на два канала. Один соединяется непосредственно с реакционной камерой 2 (канал NO), а второй соединяется с реакционной камерой 2' через термокатали-

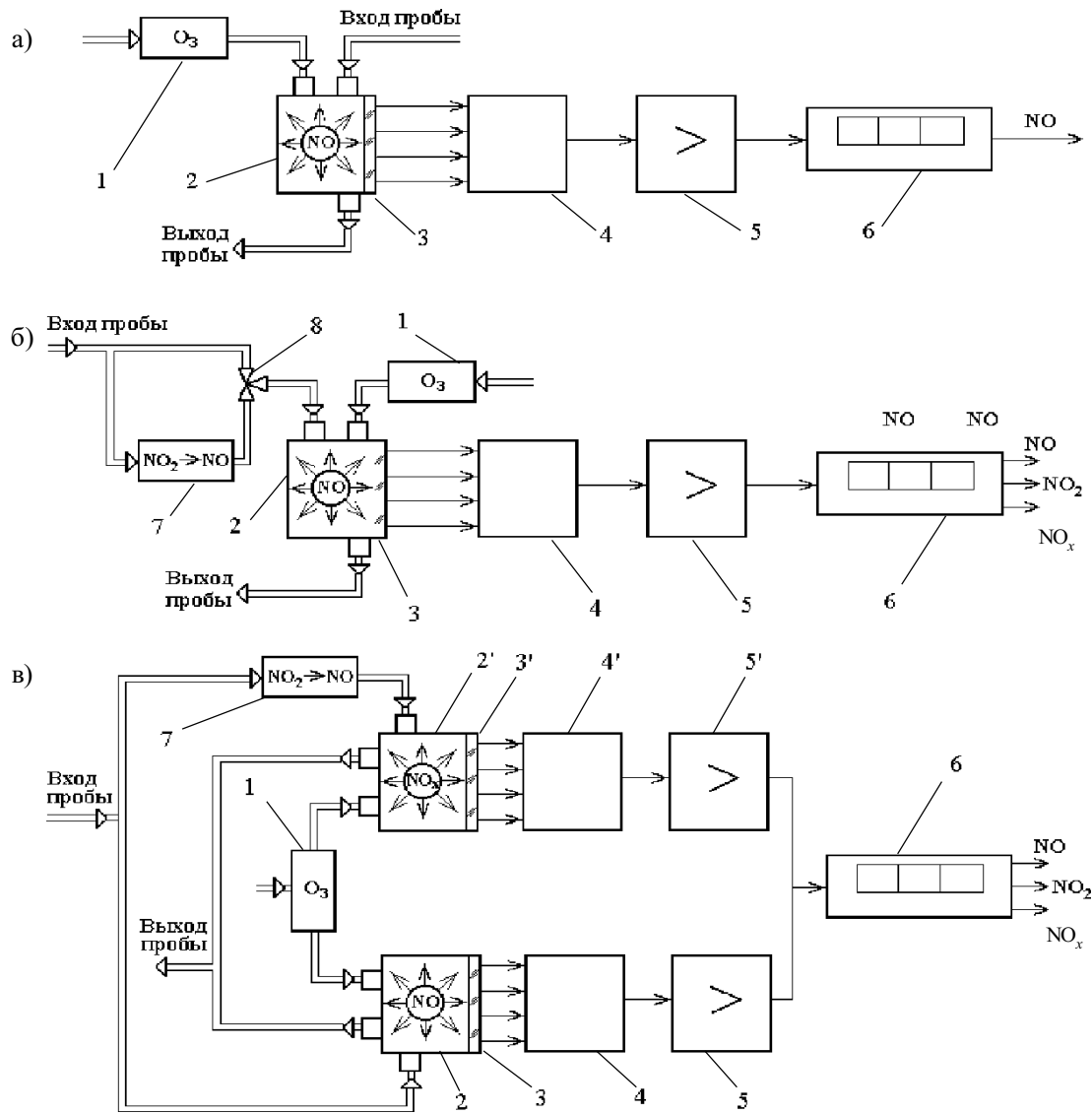


Рис. 1. Блок-схемы ХЛ ГА непосредственного отсчета:

1 — генератор озона; 2, 2' — реакционные камеры; 3, 3' — оптические светофильтры; 4, 4' — фотоэлектронный умножитель (ФЭУ); 5, 5' — усилители; 6 — блок регистрации и обработки информации; 7 — термокаталитический конвертер $\text{NO}_2 \rightarrow \text{NO}$; 8 — пневмоэлектроклапан

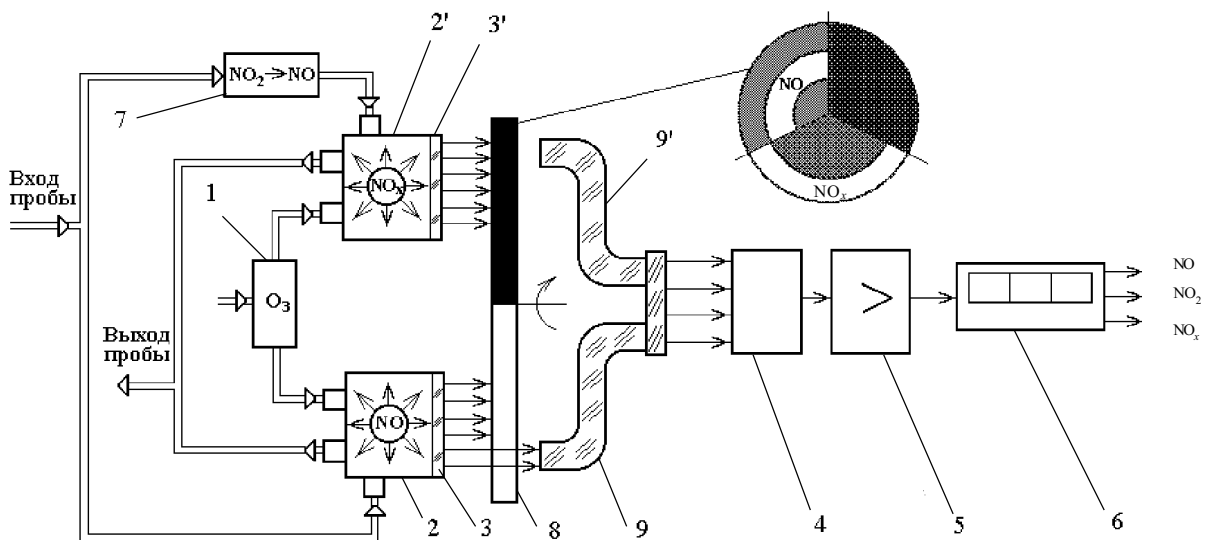


Рис. 2. Блок-схема дифференциального ХЛ-газоанализатора:

1 — генератор озона; 2, 2' — реакционные камеры; 3, 3' — оптические светофильтры; 4 — ФЭУ; 5 — усилитель; 6 — блок обработки электронного сигнала; 7 — термокаталитический конвертер $\text{NO}_2 \rightarrow \text{NO}$; 8 — обтюратор; 9, 9' — волоконно-оптические жгуты

тический конвертер 7 (канал NO_x). Озон поступает в обе реакционные камеры от генератора озона 1.

Реакции между NO и O_3 в обеих реакционных камерах одновременно вызывают хемиллюминесцентное испускание, которое через оптические светофильтры 3 и 3' поступает на ФЭУ 4 и ФЭУ 4', соединенные с соответствующими усилителями 5 и 5'. Выход усилителя 5 пропорционален концентрации NO , а усилителя 5' — концентрации NO_x . В блоке 6 производится вычитание сигналов, поступающих одновременно по каждому из каналов. Таким образом, прибор непрерывно показывает текущие концентрации NO , NO_2 и NO_x в анализируемом газе. Данная схема требует максимально возможной степени идентичности (корреляции) характеристик обоих ФЭУ, что обуславливает необходимость их специального подбора.

Поскольку в измерительной схеме с двумя фотоприемниками достичь высокой степени корреляции обоих каналов практически очень сложно, была предложена дифференциальная измерительная схема ХЛ-газоанализатора с одним фотоприемником, представленная на рис. 2.

В результате многолетних экспериментальных исследований было установлено, что на стабильность показаний ХЛ ГА, его чувствительность существенное влияние оказывает дрейф темнового тока ФЭУ и температурные изменения окружающей среды.

Для устранения влияния колебаний температуры во всех известных ГА осуществляется термостабилизация реакционных камер, узлов ФЭУ и конвертера каталитического. Для устранения влияния темнового тока ФЭУ в структуре на рис. 2 установлен обтюратор 8 для последовательного прерывания потока ХЛ-испускания, поступающего от каждой реакционной камеры через волоконно-оптические жгуты 9 и 9' на ФЭУ 4. Обтюратор выполнен таким образом, что на ФЭУ последовательно поступает сигнал ХЛ-испускания, несущий информацию о концентрации NO , концентрации NO_2 и нулевой сигнал (на ФЭУ не попадает ХЛ-испускание). В момент, когда оптические каналы обеих камер перекрыты (нулевой сигнал), в электронный блок 6 поступает информация о величине темнового тока ФЭУ, которая учитывается при обработке результатов измерений.

Совершенствование структур модуляционных хемиллюминесцентных газоанализаторов — одна из основных возможностей улучшения технических характеристик прибора.

Прерывание оптического излучения обычно предполагает наличие механических элементов, которые увеличивают стоимость прибора, требуют соответствующего ремонта и обслуживания. Возникают также проблемы, связанные со сроком службы и надежностью прибора. Поэтому в последнее время ведутся работы по применению в газоанализаторах электрических модуляторов.

Весьма эффективным для ХЛ-газоанализаторов является модуляция газовых потоков. Для этих целей часто применяют генератор озона, работающий в режиме периодического включения. Поступление озона в реакционную камеру и реакция озона с оксидом азота носит также периодический характер. Другой

способ осуществления модуляции газовых потоков заключается в подаче в реакционную камеру анализируемого газа калиброванными порциями пульсирующим потоком. В обоих случаях ФЭУ вырабатывает периодический сигнал, пропорциональный интенсивности ХЛ-испускания, который поступает в электронный блок для дальнейшей обработки. Частота такой модуляции согласуется со временем, необходимым для продувки реакционной камеры.

К достоинствам газовой модуляции следует отнести возможность использования усилителей переменного тока без специальных модуляторов, менее чувствительных и более дешевых фотоприемников для регистрации излучения.

ХЛ-метод используется также для измерения содержания озона (O_3) в атмосферном воздухе. Структурные схемы ХЛ-газоанализаторов оксидов азота и озона во многом унифицированы, что очень удобно при серийном производстве. Типовой структурой для ГА озона является структура, представленная на рис. 1, а. Отличие заключается в том, что в ГА озона отсутствует генератор O_3 . В качестве реагента могут применяться различные газы, например, этилен, меркаптаны, оксид азота. Интенсивность ХЛ-испускания в результате реакции озона с указанными газами отличается в десятки и сотни раз. Так, наиболее интенсивно проходит реакция озона с меркаптанами. В 5—6 раз слабее реакция озона с этиленом. Менее интенсивна реакция озона с оксидом азота. Практическое применение меркаптанов из-за их очень высокой токсичности невозможно. Часто применяют в качестве газа-реагента сжиженный этилен в баллонах под давлением, что требует дополнительных затрат в условиях эксплуатации (частая замена баллона, соблюдение мер по взрывобезопасности).

Для практического применения в ГА озона большой интерес представляет реакция O_3 с NO . Если в структурной схеме рис. 1, а заменить генератор озона 1 на генератор оксида азота и обеспечить соотношение концентрации оксида азота, создаваемой генератором NO , (C_{NO}^0) и концентрации озона в анализируемой смеси ($C_{\text{O}_3}^0$) $C_{\text{NO}}^0 \gg C_{\text{O}_3}^0$, то мы получим ГА озона.

На основе рассмотренных структурных схем выпускается широкая гамма ХЛ-газоанализаторов общепромышленного назначения. В таблице представлены современные модели ХЛ ГА, выпускаемые различными фирмами.

Выбор структурной схемы хемиллюминесцентного газоанализатора определяется значительным числом факторов, главные из которых — селективность, линейность, диапазон измерений, быстродействие, возможность длительной и надежной работы в тяжелых условиях эксплуатации (высокая температура, тряска, запыленность, воздействие агрессивных сред).

В зависимости от требуемых технических характеристик в хемиллюминесцентных газоанализаторах применяются различные сочетания схемных и конструктивных решений. Так, при измерении концентраций NO_x на уровне $0,001$ — 10 млн^{-1} используются

Тип ГА, фирма-производитель, страна	Назначение	Диапазоны измерений, млн ⁻¹	Тип схемы	Конструктивные особенности
645 ХЛ04, АО «Укрналит», Украина	Контроль содержания NO, NO ₂ , NO _x в атмосферном воздухе	0—10, порог обнаружения 0,003	Рис. 1, в	Без модуляции, ФЭУ — счет фотонов
645 ХЛ10, АО «Укрналит», Украина		0—10, порог обнаружения 0,001	Рис. 1, б	Газовая модуляция, ФЭУ — счет фотонов
AG 31M, Environment, Франция		0—0,05; 0—10, порог обнаружения 0,001	Рис. 2	Оптическая модуляция, ФЭУ — непрерывная регистрация
Мод. 8440, Monitor Labs, США		0—0,05; 0—10, порог обнаружения 0,002	Рис. 1, в	То же
MLU 200A, MLU, Австрия		0—0,05; 0—10, порог обнаружения 0,002	Рис. 1, б	Газовая модуляция, ФЭУ — непрерывная регистрация
344 ХЛ14, АО «Укрналит», Украина	Контроль содержания NO, NO ₂ в выбросах автотранспорта и промышленных предприятий	0—100; 0—500; 0—2000; 0—5000 Для NO ₂ 0—200	Рис. 1, б	Без модуляции, ФЭУ — непрерывная регистрация
NGA2000 CLD, Fisher-Rosemount, США		От 0—10 до 0—10000 Для NO ₂ 0—500	Рис. 1, б	То же
ГХЛ-201, АО «Укрналит», Украина	Контроль содержания NO в отходящих газах ТЭЦ	0—300 0—1500	Рис. 1, а	То же
652 ХЛ05, АО «Укрналит», Украина	Контроль содержания O ₃ в атмосферном воздухе	0—1,0, порог обнаружения 0,001	Рис. 1, а	Газовая модуляция, ФЭУ — счет фотонов

как схемы непосредственного отсчета, так и дифференциальные с электрической, оптической или газовой модуляцией сигнала. При контроле концентраций на уровне 100—5000 млн⁻¹ отдается предпочтение схемам непосредственного отсчета, представленным на рис. 1, а, б. Снижение массы, габаритов и энергопотребления газоанализатора может быть достигнуто за счет применения современной микроэлектроники.

На базе ХЛ-метода в АО «Укрналит» создана серия автоматических газоанализаторов для контроля загрязнения атмосферного воздуха оксидами азота (645 ХЛ03, 645 ХЛ04, 645 ХЛ10), для измерения концентрации оксидов азота в выхлопных газах автомобилей (344 ХЛ14), для контроля NO в отходящих газах ТЭЦ (ГХЛ-1, ГХЛ-201).

Для контроля O₃ в атмосферном воздухе здесь же разработан газоанализатор 652 ХЛ01, в котором в качестве реагента применяется сжиженный этилен в баллоне. В новой модели ГА озона 652 ХЛ05 в качестве реагента применяется оксид азота, который вырабатывается из атмосферного воздуха с помощью встроенного в ГА генератора.

Разработанные газоанализаторы эксплуатируются на многих объектах в Украине и странах СНГ.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Михеева И. Л., Куринный В. К., Таякин В. Ю., Мазыра Л. Д. Автоматические газоанализаторы загрязнения атмосферного воздуха // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2003.— № 1.— С. 28—31.

2. Примиский В. Ф. Хемилуминесцентные газоанализаторы оксидов азота // ИКА-Э.— 1989.— № 1.— С. 22—30.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Балабуха Н. П., Зубов А. С., Солосин В. С. КОМПАКТНЫЕ ПОЛИГОНЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ ОБЪЕКТОВ И ПАРАМЕТРОВ АНТЕНН.— М.: Наука, 2003.— 15 л.

Измерение характеристик рассеяния — основное средство исследования отражательной способности сложных объектов в радиолокационном диапазоне длин волн. В монографии приведены методы измерений, описаны современные измерительные установки для определения характеристик рассеяния радиолокационных целей в закрытых помещениях — компактных полигонах. Рассмотрены вопросы формирования плоских электромагнитных полей, методы и средства измерений центров рассеяния сложных объектов с высоким разрешением, моделирование характеристик рассеяния. Изложены особенности компактных полигонов при измерениях антенных устройств.

Для радиоинженеров, научных работников, аспирантов и студентов, специализирующихся в области распространения волн, радиолокации, радиоизмерений.



Г. А. ДЕВЯТКО, С. А. ЛАЦИС, В. Я. ПОДОЛЬСКИЙ,
В. В. ЗАКРАСНЯНЫЙ

Дата поступления в редакцию
23.10 2003 г.

Украина, г. Киев, АО «Украналит»; ООО «Росток-ЭЛЕКОМ»
E-mail: analyt@ukranalyt.com.ua

Оппонент к. т. н. Г. П. ПРЕПЕЛИЦА
(ОГЭУ, г. Одесса)

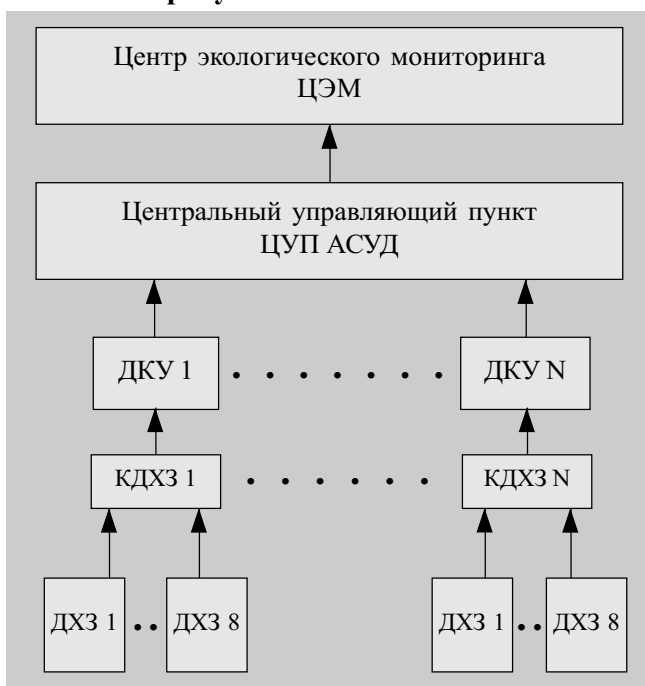
СИСТЕМА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ВОЗДУХА ВДОЛЬ АВТОМАГИСТРАЛЕЙ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

Создана система экологического мониторинга степени загрязнения воздуха выбросами автомобильного транспорта на основе современных программно-аппаратурных средств.

Загрязнение воздуха в населенных пунктах Украины на 80% обуславливается выбросами автотранспортных средств. Основой для выработки эффективных мероприятий по улучшению качества воздуха в населенных пунктах является создание и функционирование системы мониторинга воздуха вдоль автомагистралей.

В рамках «Программы создания системы мониторинга окружающей среды г. Киева на 1999—2002 гг.» специалисты АО «Украналит» и ООО «Росток-ЭЛЕКОМ» разработали программно-аппаратные средства для такой системы, основная цель создания которой — осуществление постоянного автоматического контроля и обработка результатов для определения уровня загрязнения воздуха токсичными выбросами автотранспорта.

Структурная схема системы мониторинга воздуха вдоль автомагистралей населенных пунктов представлена на рисунке.



Датчики химических загрязнений (ДХЗ) стационарно устанавливаются на контролируемых автомагистралях и осуществляют непрерывный автоматический контроль токсичных веществ в воздухе заданной зоны контроля.

ДХЗ связаны с комплектом аппаратуры детекторов химических загрязнений (КДХЗ), который представляет собой комплект аппаратно-программных средств сбора и передачи информации.

Каждый КДХЗ входит в состав соответствующего унифицированного дорожного контроллера (ДКУ) управления светофором. Полученные данные поступают по линиям связи из ДКУ в центральный управляющий пункт автоматизированной системы управления дорожным движением (ЦУП АСУД) и, далее, направляются в центр экологического мониторинга (ЦЭМ).

Разработанные в АО "Украналит" датчики химического загрязнения 603ЭХ01 представляют собой автоматические стационарные газоанализаторы непрерывного действия на основе электрохимических сенсоров, что позволило сделать дешевые компактные приборы с высоким быстродействием и достаточно простым и удобным обслуживанием во время эксплуатации.

В основе работы датчиков лежит принцип преобразования массовой доли контролируемых газов в электрический ток на основе электрохимического эффекта с использованием первичных электрохимических преобразователей (ПЭП), которые работают по методу электролиза постоянным током с сохранением определенного потенциала на поверхности рабочего электрода ПЭП. Сила тока, возникающего в результате электрохимического эффекта, пропорциональна массовой доле контролируемого газа.

Конструктивно каждый ДХЗ выполнен в виде трех отдельных модулей, размещенных в едином корпусе, который обеспечивает степень защиты от внешних влияний IP65. Контролируемый воздух поступает одновременно в каждый ПЭП датчика в непрерывном диффузионном режиме через отверстия в защитных корпусах, в которых установлены ПЭП. В состав каждого модуля, обеспечивающего измерение концентрации одного из токсичных газов (оксида углерода, диоксида азота или диоксида серы), входит соответствующий ПЭП и узел обработки информации.

Узел обработки информации обеспечивает функционирование ПЭП, поддерживая с помощью потен-

циостата определенный потенциал на его рабочем электроде, что приводит к получению линейной зависимости выходного тока ПЭП от концентрации газа, а также автоматически преобразует усиленный токовый сигнал, полученный на выходе ПЭП, в унифицированный выходной сигнал постоянного тока 4—20 мА.

В качестве ПЭП были использованы четырехэлектродные электрохимические сенсоры, разработанные и изготовленные в АО «Укрналит». Применение таких сенсоров позволяет повысить точность измерений в начальной части диапазона измерений путем стабилизации и компенсации фонового тока сенсора, уменьшить перекрестную чувствительность каждого сенсора к другим, не измеряемым им, газам, а также улучшить стабильность работы датчиков в широком диапазоне рабочих температур (от -30°C до $+40^{\circ}\text{C}$).

Основные технические характеристики датчика

Диапазон измерения:

оксида углерода	1,5—90 ppт
диоксида азота	0,3—7 ppт
диоксида серы	0,3—7 ppт

Пределы допускаемой основной приведенной погрешности $\pm 15\%$

Питание 24 В, постоянный ток

Комплект аппаратуры датчиков химических загрязнений РЕ 2007, разработанный и внедренный специалистами ООО «Росток-ЭЛЕКОМ», конструктивно размещен в унифицированном дорожном контроллере РЕ 2000 или РЕ 2011.

Каждый КДХЗ обслуживает до 8 датчиков химических загрязнений и может взаимодействовать с аппаратурой ЦУП, используя существующую городскую проводную инфраструктуру связи. Максимальная длина линии связи между каждым ДХЗ и КДХЗ составляет 1000 м. Серийно выпускаемый ООО «Росток-ЭЛЕКОМ» ЦУП РЕ 2002 снабжен комплектом аппаратуры проводной связи РЕ 2004 для связи с ДКУ на расстоянии до 15 км.

КДХЗ по двухпроводному контуру осуществляет питание каждого ДХЗ стабилизированным развязанным напряжением постоянного тока $24 \pm 1,2$ В при максимальном значении тока нагрузки до 25 мА с защитой каждого канала от перенапряжений, короткого замыкания и перегрузки.

Прием текущих мгновенных значений измерений осуществляется КДХЗ путем непрерывного дискретного опроса каждого ДХЗ. Интервал опроса установлен в 10 с. Далее в КДХЗ производится определение максимальных разовых значений концентрации загрязняющих веществ в контролируемой зоне путем усреднения мгновенных значений концентрации каждого контролируемого вещества с интервалом усреднения 20 мин. Время выполнения одного преобразования по одному каналу составляет 20 мс. Предел допустимого значения основной приведенной погрешности КДХЗ равен $\pm 1\%$.

Каждый КДХЗ обеспечивает режим тестового самоконтроля и системной калибровки, а также хранение в энергонезависимой памяти максимальных разовых значений концентрации загрязняющих веществ

в выбросах автотранспорта в контролируемой зоне по каждому каналу за последние 48 часов.

Программное обеспечение КДХЗ создано на основе современных технологий шифрования, передачи и хранения информации, что дает возможность дальнейшего применения новейших аналитических методов по обработке данных. Кроме того, аппаратура КДХЗ и ЦУП может быть снабжена комплектами аппаратуры радиосвязи РЕ 2003, что дает возможность совершенствовать систему передачи данных.

Модульное построение КДХЗ обеспечивает высокий уровень взаимозаменяемости узлов, удобство в настройке, проверке и техническом обслуживании.

Центр экологического мониторинга (ЦЭМ) представляет собой компьютерную станцию, сервер которой получает экологическую информацию через сервер удаленного доступа с ЦУП АСУД по проводным линиям связи.

Для обеспечения оперативности и надежности передачи информации от датчиков химических загрязнений в КДХЗ и, далее, в ЦУП АСУД и ЦЭМ, а также для удешевления системы мониторинга и ее технического обслуживания возможен переход от проводной связи к радиосвязи между основными ее элементами.

В ЦЭМ определяются среднесуточные, среднемесячные и среднегодовые концентрации контролируемых загрязняющих веществ, а также производится накопление, систематизация и обработка полученной информации. Обработанные данные могут быть представлены в табличном, графическом или другом виде, необходимым для пользователей.

По соответствующим программам, используя полученную информацию, с помощью аппаратуры ЦЭМ можно выполнить анализ и прогнозирование состояния воздушной среды в определенной зоне конкретной автомагистрали.

В г. Киеве начат постоянный автоматический контроль состояния воздуха вдоль автомагистралей города. Результаты контроля и анализа полученной информации используются соответствующими подразделениями администрации города для принятия решений, направленных на улучшение экологической ситуации.

В настоящее время разрабатывается государственный стандарт на технические средства автоматизированных систем дорожного движения, в котором предусмотрено, что дорожные контроллеры, управляющие работой светофоров, должны быть снабжены датчиками химического загрязнения воздуха вдоль автомагистралей.

Таким образом, дальнейшее развитие системы экологического мониторинга степени загрязнения воздуха автомагистралей населенных пунктов позволит получать объективную информацию о состоянии воздушной среды, которая необходима для выработки эффективных мероприятий по улучшению общей экологической обстановки.

Д. т. н. Ю. А. ДОЛГОВ

Молдова, г. Тирасполь, Приднестровский госуниверситет
им. Т. Г. Шевченко
E-mail: dolax@mail333.com

Дата поступления в редакцию
12.01 2004 г.

Оппонент к. т. н. О. Л. СМЕРНОВ
(ГУАП, г. С.-Петербург)

ВЫЯВЛЕНИЕ РЕЗЕРВОВ ПРОИЗВОДСТВА МЕТОДАМИ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПО ПАССИВНЫМ ДАННЫМ

Предложенные методы позволяют использовать цеховую контрольно-измерительную информацию для получения модели конкретного технологического процесса (операции).

Необходимость массового (крупносерийного) выпуска многономенклатурных однотипных изделий (например, интегральных микросхем) вынуждает промышленность прибегать к гибким автоматизированным производствам с групповым характером технологии. Однако из практики известно, что подобные производства не всегда эффективно используют сырьевые и энергетические ресурсы, могут иметь достаточно низкий процент выхода годных изделий при существенной неоднородности их параметров внутри одной партии, межоперационный контроль может быть малоэффективен — как из-за отсутствия подходящего метода, так и вследствие необъективной системы выбора контролируемых параметров, и т. п. Для уменьшения этих и других недостатков требуется управление технологическим процессом, которое будет наиболее эффективным лишь на основе математического моделирования, базирующегося на использовании накопленной контрольно-измерительной информации, полученной с помощью эффективного метода контроля по количественному признаку для конкретных типов изделий, изготовленных с помощью конкретного технологического процесса.

Методы математического моделирования, рассмотренные в большинстве работ на эту тему (например [1]), справедливо указывают на громадные преимущества свертки информации в виде математической модели, которая не только позволяет исследовать малознакомое явление (кибернетический подход к объекту как к «черному ящику»), но и прогнозировать его поведение в достаточно обширной области факторного пространства. К таким методам относится широко известный полный факторный эксперимент и множество других, являющихся дальнейшим его развитием.

Помимо чисто статистических предпосылок, все эти методы имеют общие черты: заранее созданный план эксперимента, который предусматривает изменение любого фактора по воле экспериментатора в необходимых пределах и в любых сочетаниях. Такое активное воздействие на входные показатели «чер-

ного ящика» с целью исследования реакции выходного показателя вполне уместно и допустимо в лабораторных условиях.

Однако нередко случаи, когда объект изучения характеризуется множеством показателей, которые можно измерить и зафиксировать, но нельзя произвольно изменять. Такие задачи встречаются при исследовании конкретных технологических процессов производства изделий, показателей состояния организма людей, химических и физико-механических показателей сельскохозяйственной продукции и т. п. Так, при поточном производстве изделий съем данных непосредственно в цехе исключает любые раскочки производственных факторов больше поля допуска. Чаще всего экспериментатор вынужден ограничиваться уже имеющейся информацией, полученной в ходе пооперационного контроля при прохождении изделий по цепочке технологического процесса.

В этих случаях приходится прибегать к пассивному эксперименту.

Под *пассивным экспериментом* понимают наблюдение и фиксацию числовых значений параметров (факторов) и целевой функции (функций) технологического процесса или другого объекта исследования при его естественном ходе — без искусственного вмешательства экспериментатора.

Под *результатом пассивного эксперимента* понимают таблицу, строки которой представляют собой конкретное числовое значение целевой функции при конкретном числовом наборе факторов, а столбцы — числовые значения каждого фактора в отдельности, т. е. выборки факторов определенного объема. Такая таблица, как правило, является результатом длительных контрольных измерений выходного показателя качества однородной продукции и сопутствующих ему факторов, например, режимов технологических операций или параметров самого изделия на предшествующих операциях.

Таблица пассивного эксперимента представляет собой основу для решения достаточно сложной в теоретическом и практическом планах задачи по извлечению из нее скрытой информации, конечная цель которой — получение математической модели исследуемого объекта в виде уравнения многомерной регрессии. Эти трудности обусловлены следующими обстоятельствами.

Во-первых, никакого искусственного изменения (управления) факторов в достаточно широких пределах нет, а имеет место лишь естественное производственное варьирование, как правило, в пределах допуска на фактор, т. е. сравнительно малое. Это озна-

чает, что изменение целевой функции может быть также небольшим, и чтобы отличить его от шумовых флюктуаций, необходимо иметь достаточно длинную таблицу, в которой возможный эффект воздействия конкретного фактора на целевую функцию проявился бы в полной мере. Опытным путем установлено, что таблица результатов пассивного эксперимента будет достаточно длинной, если на каждый исследуемый в ней фактор приходится 10—15 строк, но не более 350 строк всего, т. к. в силу неизбежной, хотя и очень слабой, корреляции при дальнейшем увеличении объема выборки будет возрастать ошибка результата [2, с. 43].

Во-вторых, при составлении первоначального списка факторов у исследователя нет информации о конкретном влиянии каждого фактора на целевую функцию. Исследования показали, что, как правило, таблицы исходных данных представляют собой так называемые сверхнасыщенные планы, часть факторов которых не влияет на целевую функцию и, в конце концов, уйдет в шум эксперимента. Отсев таких факторов может производиться на основе объективных (например, метод случайного баланса) или субъективных (разные методы экспертных оценок) [3] методов, в результате чего размерность факторного пространства сокращается в 2—5 раз без существенной потери информации.

В-третьих, в первоначальном списке факторы могут быть сильно коррелированы между собой. Естественно, что каждая пара таких факторов должна быть разбита, т. е. один из факторов должен быть отброшен как не дающий дополнительной информации в будущей модели, а другой оставлен для дальнейшей работы. Наиболее подходящим для этого методом является метод корреляционных плеяд, описанный в [4]. При этом размерность факторного пространства сокращается еще в 2—5 раз без существенной потери информации.

В результате получается таблица некоррелированных (точнее, слабокоррелированных) данных, которая и является исходной для любых методов математического моделирования. Обработка такой таблицы может производиться несколькими методами. Наиболее удачным из них является модифицированный метод случайного баланса (ММСБ), т. к. хорошо работает в условиях гетероскедастичности (при неравных дисперсиях), самоочищается от помех в каждой строке плана на каждом этапе расчетов [3].

Модифицированный метод случайного баланса (ММСБ)

Требование активного эксперимента во всех факторных планах связано с желанием получить точки факторного пространства, расположенные в вершинах гиперкуба, вписанного в гиперсферу определенного радиуса, тем самым равномерно охватить базовую точку (центр исследования) и получить возможно меньшую дисперсию оценок коэффициентов регрессии. Поэтому таблицу экспериментальных данных, полученных при пассивном эксперименте, можно рассматривать как таблицу координат беспорядочно расположенных точек факторного пространства и откликов целевой функции в этих точках. Естественно, что все такие точки не могут лежать в вершинах гиперкуба или хотя бы на гиперсфере одного радиуса, однако с приемлемой ошибкой можно выбирать некоторые из них. При этом бессмысленно пытаться отыскать в таблицах экспериментальных данных точные координаты вершин гиперкуба, и даже если таковые найдутся по одному фактору, то по другим факторам они не совпадут с нужными значениями. Для получения приемлемого плана эксперимента предлагается следующий прием.

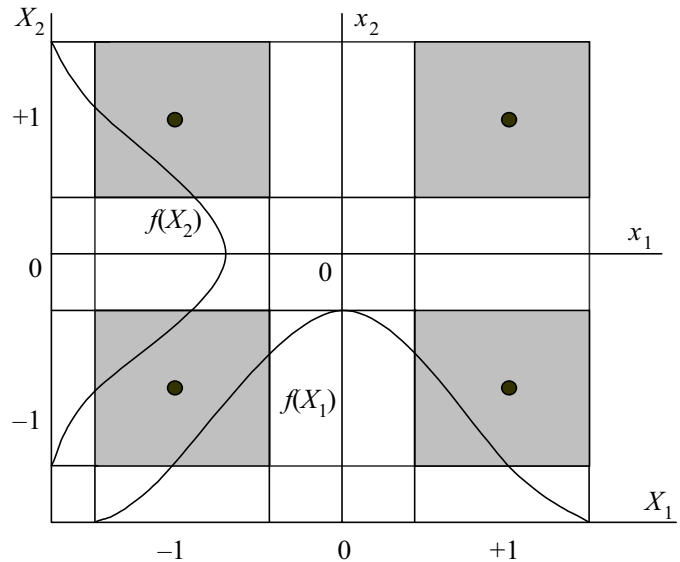


Схема преобразования координат факторов

Любые факторные планы, в том числе ММСБ, одним из предварительных этапов в планировании имеют переход от координат с абсолютными единицами измерения факторов к координатам с относительными единицами, где единичной мерой служит достаточно произвольно выбранный шаг ΔX_k , свой для каждого фактора. Тем самым достигается преобразование координат таким образом, что в факторном пространстве получают концентрические гиперсферы, а не другие фигуры, а выбор вершин гиперкуба в качестве точек проведения активного эксперимента автоматически обеспечивает выбор только одной гиперсферы.

В случае пассивного эксперимента каждый фактор X_k имеет в таблице экспериментальных данных целый диапазон значений от X_{kmin} до X_{kmax} и, следовательно, может быть рассмотрен как выборка с центром \bar{X}_k . По-видимому, разбиение этого диапазона на две части (т. е. все $X_k > \bar{X}_k$ относятся к областям $x_k = +1$, а все $X_k < \bar{X}_k$ относятся к областям $x_k = -1$) является слишком грубым. Гораздо целесообразнее всю область $X_{kmax} - X_{kmin}$ разбить на три части — приблизительно (но необязательно) одинаковые по вероятности попадания в них, причем за центр всей группировки принять среднюю арифметическую \bar{X}_k , высчитанную по большому количеству данных. Поскольку в большинстве случаев факторы распределены по законам, близким к нормальному, то границами областей могут стать точки $\bar{X}_k - zS_k$ и $\bar{X}_k + zS_k$, где S_k — среднеквадратическое отклонение значений фактора X_k . Тогда все значения $X_k \leq \bar{X}_k - zS_k$ отнесем к областям $x_k = -1$, все значения $X_k \geq \bar{X}_k + zS_k$ отнесем к областям $x_k = +1$, а все значения $\bar{X}_k - zS_k < X_k < \bar{X}_k + zS_k$ отнесем к областям $x_k = 0$.

Схема преобразования координат факторов из именованной области в относительную приведена на рисунке. Здесь символом X_k обозначаются значения k -го фактора в абсолютных единицах, x_k — в относительных, а величина z может меняться в пределах 0,25—0,5 по желанию исследователя.

Таким образом, вершины гиперкуба превратились из точек в довольно обширные, хотя и строго локализованные, области, что эквивалентно утолщению оболочки гиперсферы. Следовательно, необходимая точность выделения значимых факторов для построения модели может быть обеспечена только за счет увеличе-

ния числа опытов в каждой такой локализованной области факторного пространства. Последнее требование легко выполняется, т. к. при пассивном эксперименте можно накапливать опытные данные достаточно долго.

Проделав работу по преобразованию координат факторов, получаем из таблицы экспериментальных данных таблицу планирования квазиактивного эксперимента, каждая строка которой представляет собой координату точки факторного пространства в виде набора относительных величин $-1, 0, +1$ и результат эксперимента в этой точке Y . При этом вопрос о порядке реализации строк плана отпадает, а рандомизацию можно проводить только косвенно, т. е. нужно стараться, чтобы в план попали строки, реализованные достаточно далеко друг от друга во времени.

Число строк плана может быть очень большим, что затрудняет его обработку, причем часть работы будет проделана явно зря в силу исходной идеи о сверхнасыщенности плана и обязательном отсеивании части факторов. Поэтому при большом объеме целесообразнее сначала строить не весь план, а часть его, на котором провести предварительный этап выделения существенных факторов и парных взаимодействий (эффект взаимодействий более высокого порядка искать нецелесообразно в силу сознательного огрубления оболочки гиперсферы, т. е. увеличения шума эксперимента).

Предварительный план можно составить из двух контрастных по выходной величине групп строк, одна из которых содержит значения Y в границах, например, $(\bar{Y} - 1,5S_y) - (\bar{Y} - 1,0S_y)$, а другая — в границах $(\bar{Y} + 1,0S_y) - (\bar{Y} + 1,5S_y)$. Такое построение плана отсекает области слишком маленьких и слишком больших значений (которые могут быть следствием случайных грубых промахов), а также области вокруг центра распределения (которая ничего не говорит о влиянии раскочки факторов). Границы контрастных областей, безусловно, могут быть и другими, но общая идея создания предварительного контрастного плана должна сохраняться.

Последнее общее требование факторных планов — гомоскедастичность (при равных дисперсиях) — в квазиактивном плане ММСБ нарушается, поэтому для расчетов оценок коэффициентов регрессии b_k и их дисперсии D_k следует использовать специальные выражения, учитывающие поправки на это нарушение гомоскедастичности (гетероскедастичность) и являющиеся в этих условиях более эффективными, чем другие оценки.

Оптимальную оценку будем искать в виде

$$b_k = \alpha_{1k}\mu_{1k} - \alpha_{2k}\mu_{2k},$$

где α_{1k} и α_{2k} — некоторые положительные, подлежащие определению весовые коэффициенты, для которых справедливо равенство $\alpha_{1k} + \alpha_{2k} = 1$.

Установлено [3, с. 145], что оценку b_k можно подсчитать по формуле

$$b_k = \frac{\left(\frac{D_{2k}}{N_{2k}} + 2m_k^2\right)\mu_{1k} - \left(\frac{D_{1k}}{N_{1k}} + 2m_k^2\right)\mu_{2k}}{\frac{D_{1k}}{N_{1k}} + \frac{D_{2k}}{N_{2k}} + 4m_k^2}, \quad (1)$$

а ее дисперсию — по формуле

$$D_k = \frac{\frac{D_{1k}}{N_{1k}} \frac{D_{2k}}{N_{2k}} + \left(\frac{D_{1k}}{N_{1k}} + \frac{D_{2k}}{N_{2k}}\right)m_k^2}{\frac{D_{1k}}{N_{1k}} + \frac{D_{2k}}{N_{2k}} + 4m_k^2}, \quad (2)$$

где

$$\mu_{1k} = \frac{1}{N_{1k}} \sum_{j=1}^{N_{1k}} Y_j^{(1k)};$$

$$\mu_{2k} = \frac{1}{N_{2k}} \sum_{j=1}^{N_{2k}} Y_j^{(2k)};$$

$\{Y_j^{(1k)}\}_{N_{1k}}$ — подмножество элементов из общей выборки выходной величины, для которых знак x_{kj} положителен;
 $\{Y_j^{(2k)}\}_{N_{2k}}$ — то же для случая, когда знак x_{kj} отрицателен;

N_{1k} и N_{2k} — объемы соответствующих подмножеств, причем $N_k = N_{1k} + N_{2k}$ — общий объем выборки выходной величины для k -го фактора;

$j=1 \dots N$ — номер строки плана эксперимента;

m_k — оценка математического ожидания всего эксперимента —

$$m_k = \frac{1}{N_k} (\mu_{1k} N_{1k} + \mu_{2k} N_{2k});$$

D_{1k}, D_{2k} — дисперсии выходной величины соответственно при положительных и отрицательных значениях фактора x_k —

$$D_{1k} = \frac{1}{N_{1k} - 1} \sum_{j=1}^{N_{1k}} (Y_j^{(1k)} - \mu_{1k})^2;$$

$$D_{2k} = \frac{1}{N_{2k} - 1} \sum_{j=1}^{N_{2k}} (Y_j^{(2k)} - \mu_{2k})^2.$$

Такая оценка коэффициентов регрессии (математической модели) имеет минимальную систематическую и случайную ошибки, при этом никаких ограничений на равенство (неравенство) дисперсий частных выборок не накладывается.

Поскольку методика позволяет одновременно с оценками b_k находить и их дисперсии D_k , то для отсеивания незначимых факторов (выделения значимых) можно воспользоваться известной процедурой нахождения критерия Стьюдента и сравнения его с табличным значением —

$$t_k = \frac{|b_k|}{\sqrt{D_k}} \geq t_{\text{табл}}(q; \nu_k) \quad (3)$$

с уровнем значимости q и числом степеней свободы $\nu_k = N_k - 2$ (где N_k — число строк плана, определенных для фактора x_k). Выполнение условия (3) определяет значимость k -го фактора (или соответствующего парного взаимодействия).

Если из первоначальной матрицы планирования изъять столбцы, соответствующие незначимым факторам, то новая матрица планирования, как правило, перестает быть сверхнасыщенным планом. Кроме того, у новой матрицы появляются совпадающие строки. Такие строки необходимо совместить. Практически это означает появление в столбце результатов неодинакового количества измерений, или, другими

Экспериментальные данные

X_1	X_2	X_3	Y	X_1	X_2	X_3	Y	X_1	X_2	X_3	Y	X_1	X_2	X_3	Y
245	256	29,4	64,2	249	271	20,4	65,3	199	311	26,8	65,2	209	237	16,9	56,0
274	268	22,5	68,2	151	282	17,5	54,7	282	335	27,5	78,0	299	311	23,2	76,5
318	282	21,2	75,0	238	229	24,2	59,4	255	178	14,6	53,9	195	285	24,1	61,2
232	315	24,5	69,3	300	245	32,8	47,1	207	268	18,2	59,7	299	316	24,1	77,3
243	198	23,5	56,1	212	157	21,4	47,1	211	254	22,0	59,0	152	304	18,4	57,7
153	330	25,2	61,9	193	304	28,0	63,8	235	299	17,3	66,7	300	302	19,3	75,0
251	320	25,9	72,3	195	202	24,7	51,0	324	331	25,9	82,1	248	364	24,8	77,2
197	234	22,0	54,9	219	260	20,0	60,4	312	273	24,3	73,5	238	219	25,3	58,3
217	244	27,4	59,1	258	247	27,4	64,4	243	223	15,8	58,1	292	267	22,0	70,1
223	246	18,6	59,0	230	248	25,8	61,0	236	278	23,5	65,1	238	322	24,0	70,8
274	279	25,0	69,9	144	288	21,9	55,2	228	181	20,0	51,8	343	309	24,5	82,0
193	257	18,0	56,7	172	341	24,7	65,5	272	260	23,4	28,2	274	248	17,4	65,1
145	315	21,7	58,6	220	246	18,4	58,6	309	251	18,7	69,8	265	309	26,3	72,2
225	293	21,7	65,4	278	215	27,5	62,8	194	240	24,9	55,6	309	303	19,2	76,2
319	234	27,2	70,0	208	284	21,6	62,3	169	304	27,1	60,8	263	194	17,4	57,2
215	266	26,8	61,5	204	280	23,0	61,5	197	275	21,2	59,8	323	298	32,1	78,9
299	286	18,5	72,9	273	231	30,8	64,6	194	198	24,4	50,4	205	319	34,8	67,9
192	287	19,8	60,5	180	286	23,3	59,4	245	251	22,8	62,7	215	253	22,6	59,4
207	242	21,5	57,0	199	233	24,4	55,3	190	316	25,4	64,5	286	300	25,8	74,0
255	182	20,5	55,1	289	309	22,0	74,9	256	278	22,9	67,4	177	294	19,1	59,5
277	260	21,0	67,4	256	263	18,2	64,9	230	198	24,0	54,6	216	195	22,6	52,4
209	314	20,9	66,0	164	289	18,9	57,3	258	325	24,9	73,6	253	225	19,0	60,0
222	275	22,8	63,0	158	317	24,7	60,8	202	229	24,6	55,2	175	262	22,8	55,8
176	317	20,7	62,4	251	253	24,9	64,0	289	336	33,2	79,7	203	324	34,0	68,2
213	273	26,4	62,1	172	299	20,3	59,7	203	259	22,4	58,7	157	288	20,4	56,6
255	221	22,4	60,2	254	239	19,3	61,9	146	307	20,1	57,6	203	292	24,1	63,0
283	293	17,2	71,7	210	356	24,6	71,7	343	313	25,9	82,3	258	272	20,2	66,5
206	324	26,3	67,5	229	254	20,1	60,9	262	296	17,1	69,5	142	292	22,9	55,6
252	223	30,5	61,1	195	264	20,5	58,2	181	242	22,0	54,0	202	251	16,6	56,8
294	263	21,0	69,8	294	286	28,4	73,5	218	302	17,7	65,1	205	281	30,6	62,7
241	265	19,9	63,6	288	254	33,2	69,5	195	268	20,9	58,7	265	260	23,4	66,3
221	263	16,0	60,5	292	268	12,3	69,0	190	223	25,6	53,1	273	230	32,3	64,7
186	312	26,6	63,7	242	267	22,9	64,4	157	291	17,6	56,6	205	255	16,8	57,7
222	276	29,8	64,0	278	240	24,3	65,5	330	316	24,0	65,3	340	207	31,6	65,3
241	280	24,2	66,0	319	284	24,5	75,7	238	236	23,7	60,2	188	253	19,6	55,8
261	303	24,8	71,3	324	311	23,2	78,3	226	213	17,9	55,2	215	255	22,2	59,6
341	301	17,6	79,5	278	229	30,7	64,9	336	301	17,7	79,0	185	337	25,4	66,5
260	266	21,1	66,1	160	295	22,2	58,0	241	222	19,1	58,2	149	288	17,1	55,2
214	286	18,8	62,8	260	262	17,4	65,2	129	282	20,0	52,5	338	281	24,7	77,6
195	302	25,6	63,4	167	278	18,3	56,2	165	333	27,9	64,0	228	228	29,3	58,9
201	248	21,3	57,0	293	286	22,6	72,7	228	202	23,9	54,8	300	323	24,4	78,3
270	281	23,4	69,4	215	242	21,1	57,9	228	244	19,8	59,5	205	243	26,7	57,5
301	299	22,1	75,2	270	224	17,8	61,7	211	261	26,3	60,4	255	279	21,2	67,1
172	337	25,2	65,0	328	299	24,6	78,7	214	281	27,5	63,4	252	292	22,5	68,6

словами, строки матрицы планирования имеют разные объемы выборок результатов m_j .

Поскольку исходный план реализовывался всего лишь однократно, то в результатах эксперимента могли быть грубые промахи, которые, естественно, остались незамеченными. Теперь же, имея в каждой строке новой матрицы выборку объемом m_j , можно все их проверить на однородность (отсутствие аномальных результатов) любым из известных способов. В очищенных от грубых промахов строках плана вычисляются средние арифметические и дисперсии однородных результатов. Полученные значения можно использовать при проверке на воспроизводимость опытов, которую — в силу неодинакового объема выборок строк m_j — следует проводить по критерию Бартлетта [5, с. 271]. При этом средняя дисперсия опытов может быть принята равной средневзвешенной $S^2\{Y\} = S_p^2$.

По данным новой матрицы планирования и уточненным результатам эксперимента вновь по формулам (1) и (2) вычисляют оценки коэффициентов регрессии b_k и их дисперсии D_k и проверяют найденные оценки на значимость по формуле (3). Если при этом происходит отсеивание хотя бы одного фактора, то процедура с изъятием столбцов матрицы, соответствующих этим незначимым факторам, с объединением совпадающих строк, повторной проверкой на однородность и перерасчетом оценок коэффициента регрессии повторяется. Если же при очередной проверке на значимость ни одна оценка коэффициентов регрессии не отвергнута, то математическая модель считается найденной, причем оценки ее коэффициентов берутся из последнего цикла расчетов.

Из плана эксперимента можно извлечь дополнительную информацию о влиянии парных взаимодействий, которые иногда могут быть больше влияния каждого фактора в отдельности. С этой целью в план эксперимента включаются столбцы парных взаимодействий, каждая координата которых получается простым перемножением кодов координат исходных факторов. Проверка парных взаимодействий на значимость ничем не отличается от соответствующей процедуры для каждого из основных факторов. Рассматривать взаимодействия более высокого порядка (тройные, четверные и т. д.) не имеет смысла, т. к. их влияние на входную величину заведомо меньше шумового фона.

Таким образом, оценки коэффициентов значимых факторов и их парных взаимодействий составят модель вида

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i \neq f} b_{if} x_i x_f, \quad (4)$$

которую необходимо проверить на адекватность с помощью критерия Фишера. Дисперсию эксперимента $S^2\{Y\}$ заменит средневзвешенная дисперсия S_p^2 , а дисперсию адекватности можно подсчитать по формуле

$$S_{ад}^2 = \frac{1}{\sum_{j=1}^N m_j - d} \sum_{j=1}^N m_j (\bar{Y}_j - \hat{Y}_j)^2, \quad (5)$$

где число степеней свободы $\nu_{ад} = \sum_{j=1}^N m_j - d$.

Все вышесказанное относится к классическому случаю, когда выходная величина распределена по нормальному закону. Однако в условиях пассивного эксперимента нередки случаи, когда выходная величина, будучи унимодальной (одновершинной), отличается от нормального закона. Правила требуют, чтобы она была приведена к нормальному закону распределения путем некоторого преобразования (логарифмирования, возведения в степень и т. д.). Однако при ближайшем рассмотрении оказывается, что требование нормального закона связано в основном с проверкой адекватности модели по критерию Фишера, который очень чувствителен к отклонению от него.

Исследования показали, что процедура ММСБ дает хорошие результаты даже при значительном отклонении распределения выходной величины от нормального закона как по мере косости (асимметрии), так и по мере крутости (экссесс), лишь бы само распределение оставалось унимодальным. При этом для проверки адекватности модели вместо критерия Фишера необходимо воспользоваться каким-нибудь другим критерием, не так тесно связанным с нормальным законом, например, критерием χ^2 Пирсона, который в этом случае примет вид

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^N \frac{m_j (\bar{Y}_j - \hat{Y}_j)^2}{\hat{Y}_j} \leq \chi_{табл}^2 (q; \nu = N - 1), \quad (6)$$

где m_j — число экспериментальных данных ν -й строке плана.

Выбор способа проверки математической модели на адекватность зависит от исследователя.

Для иллюстрации возможностей ММСБ и последующих методов рассмотрим ряд производственных примеров на одном и том же статистическом материале (табл. 1), который представляет собой таблицу экспериментальных данных (результат контрольных измерений) некоторой технологической операции производства кристаллов ИМС после сокращения размерности факторного пространства до трех слабокоррелированных между собой факторов X_k (без указания их конкретных названий и размерностей, в данном случае это несущественно) и процента выхода годных кристаллов Y для каждой пластины (строки).

Пример 1. Используя данные табл. 1, найти математическую модель процента выхода годных кристаллов интегральных микросхем.

Решение. Прежде всего необходимо построить план квазиактивного эксперимента, для чего потребуется предварительно решить три задачи: определить вид закона распределения выходной величины, найти грубые промахи (если есть) и выбрать величину z для определения границ областей $x_k=0$.

Исследование показало, что процент выхода кристаллов Y табл. 1 распределен по закону, отличному от нормального, но это отличие невелико, поэтому преобразования Y для приведения его к нормальному закону делать не будем. В качестве грубого промаха величины Y следует принять значение 28,2%, что ясно из гистограммы, если ее построить. Это — первая очистка данных. Величину z выберем равной $z=0,5$. Тогда области $x_k=-1$

и $x_k=+1$ определятся из выражения $\bar{X}_k = \pm 0,5 S_k$, а план эксперимента и расслоение его результатов по строкам после удаления грубых промахов получится таким, как представлено в табл. 2. Здесь мы не воспользовались приемом построения предварительного плана, т. к. число факторов и длина исходной таблицы сравнительно невелики:

Факторы	Области	
	$x_k = -1$	$x_k = +1$
X_1	$\leq 212,7$	$\geq 262,4$
X_2	$\leq 252,3$	$\geq 290,7$
X_3	$\leq 20,9$	$\geq 25,0$

Выходная величина Y расслоилась в табл. 2 на строчные выборки, с помощью которых можно провести дополнительную проверку на выявление и устранение скрытых грубых промахов, не замеченных при построении гистограммы. Проверку можно проводить любым из известных [6] способов. Так, к грубым промахам можно отнести число 71,7 в 8-й строке, число 47,1 в 21-й строке.

Так как число попаданий результатов эксперимента в различные строки плана m_j неодинаково, то проверку воспроизводимости делаем по критерию Бартлетта [5, с. 271]

$$Q = \frac{1}{1,055} [330,74 - 305,82] = 23,62 < \chi^2_{\text{табл}}(5\%; 18) = 28,87.$$

Полученное неравенство свидетельствует о том, что все строчные дисперсии однородны и имеют лишь случайное отклонение от средневзвешенной дисперсии опыта $S_p^2 = 10,44$ с $\nu = 141$ числом степеней свободы. В свою очередь, доказанная однородность строчных дисперсий означает, что результаты опытов правильно отражают реальную картину исследуемого объекта, могут быть

повторно воспроизведены при новых измерениях и их можно использовать для дальнейших расчетов.

Для нахождения оценок коэффициентов, их дисперсий и определения их значимости воспользуемся формулами (1) — (3). Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Величины m_k для каждого k -го фактора будут своими, и в силу этого оценку b_0 следует искать как среднее арифметическое всех значений выходной величины Y , полученных экспериментальным путем, кроме выявленных грубых промахов.

Поскольку значимыми факторами следует признать x_1, x_2, x_3 и x_1x_2 , а величина $b_0 = 63,94$, то искомая модель может быть представлена в виде

$$\hat{Y} = 63,94 + 6,50x_1 + 5,25x_2 + 2,40x_3 + 2,68x_1x_2.$$

Проверку адекватности полученной модели необходимо проводить по критерию Пирсона [7] в силу отклонения выходной величины Y от нормального закона:

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^{27} m_j \frac{(\bar{Y}_j - \hat{Y}_j)^2}{\hat{Y}_j} = 10,24 < \chi^2_{\text{табл}}(5\%; 26) = 38,89.$$

Таким образом, найденная модель правильно отражает экспериментальные данные и может быть использована для анализа работы и для оптимизации исследуемого объекта.

Таблица 2

План ММСБ, результаты эксперимента и их частичная обработка

j	x_1	x_2	x_3	Y_{ji}	m_j	\bar{Y}_j	S_j^2	\hat{Y}_j	$m_j(\bar{Y}_j - \hat{Y}_j)^2$
1	-	-	-	56,0; 56,8	2	56,4	—	52,47	30,89
2	-	-	0	54,9; 57,0; 57,0; 51,0; 55,3; 54,0; 55,2; 55,6; 50,4	9	54,5	5,54	54,87	1,23
3	-	-	+	57,5; 53,1	2	55,3	—	57,27	7,76
4	-	0	-	56,7; 60,5; 54,7; 57,3; 58,2; 56,2; 56,6; 57,7; 55,8; 55,2; 52,5; 58,7; 59,7	13	56,9	4,62	55,04	44,97
5	-	0	0	55,2; 62,3; 61,5; 59,4; 61,2; 55,8; 58,7; 59,8	8	59,2	6,73	57,44	24,78
6	-	0	+	62,7	1	62,7	—	59,84	8,18
7	-	+	-	66,0; 62,4; 56,6; 59,7; 57,7; 59,5; 57,6	7	59,9	10,78	57,61	36,71
8	-	+	0	58,6; 60,8; 71,7; 58,0; 63,0; 55,6	5	59,2	7,94	60,01	3,28
9	-	+	+	61,9; 67,5; 63,7; 63,4; 65,0; 63,8; 65,5; 67,9; 68,2; 66,5; 64,0; 60,8; 64,5; 65,2	14	64,8	4,72	62,41	79,97
10	0	-	-	59,0; 55,1; 59,5; 58,6; 61,9; 55,2; 60,0; 53,9; 58,2; 51,8; 58,1	11	57,4	9,03	56,29	13,55
11	0	-	0	56,1; 60,2; 59,4; 47,1; 57,9; 52,4; 60,2; 62,7; 54,6; 54,8	10	56,5	20,8	58,69	47,96
12	0	-	+	59,1; 61,1; 64,4; 61,0; 58,3; 58,9	6	60,5	5,03	61,09	2,09
13	0	0	-	63,6; 60,5; 62,8; 65,3; 60,4; 64,9; 60,9; 65,2; 66,5	9	63,3	5,34	61,54	27,88
14	0	0	0	63,0; 66,0; 66,1; 64,0; 64,4; 59,4; 59,6; 67,1; 67,4; 59,0; 65,1	11	63,7	9,67	63,94	0,63
15	0	0	+	64,2; 61,5; 62,1; 64,0; 60,4; 63,4	6	62,6	2,29	66,34	83,93
16	0	+	-	65,1; 66,7	2	65,9	—	66,79	1,58
17	0	+	0	69,3; 65,4; 77,2; 70,8; 68,6; 73,6	6	70,8	17,01	69,19	15,55
18	0	+	+	72,3	1	72,3	—	71,59	0,50
19	+	-	-	61,7; 65,1; 57,2; 69,8	4	63,4	28,39	60,11	43,30
20	+	-	0	65,5	1	65,5	—	62,51	8,94
21	+	-	+	70,0; 47,1; 62,8; 64,6; 64,9; 64,7; 69,7	6	66,1	8,94	64,91	8,50
22	+	0	-	72,9; 69,0	2	70,9	—	68,04	16,36
23	+	0	0	68,2; 75,0; 69,9; 67,4; 69,8; 69,4; 75,7; 72,7; 70,1; 66,3; 77,6; 73,5	12	71,3	12,60	70,44	8,88
24	+	0	+	73,5; 69,5	2	71,5	—	72,84	3,59
25	+	+	-	71,4; 79,5; 79,0; 75,0; 76,2; 69,5	6	75,1	15,74	75,97	4,54
26	+	+	0	71,3; 75,2; 65,3; 74,9; 78,3; 78,7; 76,5; 82,0; 78,3	9	75,6	23,90	78,37	69,06
27	+	+	+	77,3; 72,2; 78,9; 74,0; 82,3; 79,7; 82,1; 78,0	8	78,1	12,73	80,77	57,03

Таблица 3
Расчет оценок коэффициентов модели

Параметр оценки	Факторы и взаимодействия					
	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3
N_{1k}	50	58	46	36	38	40
μ_{1k}	72,25	69,11	66,44	68,60	64,11	65,0
D_{1k}	22,42	46,84	39,15	108,80	69,56	56,69
N_{2k}	61	51	56	37	29	29
μ_{2k}	59,24	58,61	61,64	63,23	66,48	64,56
D_{2k}	13,40	16,11	35,41	8,39	30,28	39,78
m_k	65,10	64,20	63,80	65,88	65,14	64,85
b_k	6,50	5,25	2,40	2,68	-1,18	0,25
D_k	0,17	0,28	0,37	0,81	0,72	0,70
t_k	15,91	9,90	3,94	2,57	1,40	0,30
$t_{табл}$	1,98	1,98	1,98	1,99	2,00	2,00

Любопытно отметить, что в данном случае критерий Фишера также подтвердил правильность нахождения модели. С учетом всех измерений

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N m_j (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2}{\sum_{j=1}^N m_j - d} = \frac{651,64}{173 - 5} = 3,88$$

и

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_p^2} = \frac{3,88}{10,44} < 1.$$

Если считать только по средним арифметическим строк плана, то

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2}{N - d} = \frac{120,67}{27 - 5} = 5,49$$

и

$$F = \frac{5,49}{10,44} < 1.$$

Метод наименьших квадратов с предварительной ортогонализацией факторов (МНКО)

Математические модели, найденные с помощью ММСБ, в большинстве практических случаев удовлетворяют задачам прогнозирования выходного показателя качества управления технологическим процессом. Однако, как всякая неполная квадратическая модель, выражение типа (4) перестает правильно работать в области факторного пространства, близкой к экстремуму, т. е. когда необходимо переходить к планированию второго порядка. Кроме того, утолщение гиперболы в ММСБ заведомо огрубляет коэффициенты регрессии, следовательно, уменьшает точность аппроксимации выходной величины исследуемого объекта найденной моделью. Наконец, необходимость работать не с именованными факторами X_k , а с их кодированными значениями x_k может вызывать затруднения у рабочих-операторов соответствующих технологических линий. Таким образом, имеется необходимость в поиске еще одного метода моделирования по пассивным данным, свободного от указанных особенностей.

Среди множества методов обработки экспериментальных данных наибольшее распространение получил классический метод наименьших квадратов (МНК), разработанный Гауссом и Лежандром. В основу расчетов коэффициентов регрессионного уравнения по МНК положена минимизация квадрата отклонений наблюдаемых значений Y_j от эмпирической линии регрессии $M\{Y_j/X_1, X_2, \dots, X_n\}$:

$$\sum_{j=1}^N [Y_j - M\{Y_j / x_1, x_2, \dots, x_n\}]^2 = \min . \quad (7)$$

При этом обязательно должно соблюдаться общее для всех методов регрессионного анализа условие независимости (некоррелированности) факторов.

Однако при обработке результатов пассивного эксперимента, в отличие от результатов специальным образом спланированного активного эксперимента, вследствие неортогональности пассивного планирования коэффициенты регрессии, полученные МНК, становятся комплексными характеристиками всей совокупности аргументов и не могут быть признаны эффективными (т. е. полученными с минимальной дисперсией). В этом случае оценка значимости коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента становится некорректной, а признание незначимым и отбрасывание какого-либо из найденных коэффициентов регрессии требует пересчета оставшихся коэффициентов заново. Предпринимались попытки упростить и упорядочить процедуру нахождения коэффициентов модели, но дело ограничилось некоторыми частными случаями. Естественно, такая громоздкая процедура крайне нежелательна в системах оперативного анализа ситуации и управления технологическим процессом.

Проблема существенного упрощения процедуры определения коэффициентов регрессии может быть решена путем подбора для каждой регрессионной задачи своей специальной системы линейно-независимых функций $\Psi(X)$ — таких, чтобы матрица системы нормальных уравнений $X^T X$ была единичной.

Рассмотрим применение ортогональных полиномов Чебышева для случая многомерной регрессии [3, с. 183—192]. Неизвестную нам связь между выходной величиной Y и факторами X_i будем искать в виде следующего полинома, включающего эффекты факторов и их взаимодействий:

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{\substack{i,g=1 \\ i \neq g}}^n b_{ig} X_i X_g + \dots + \sum_{i=1}^n b_{ii} X_i^2 + \dots = \sum_{k=0}^m b_k z_k, \quad (8)$$

где n — количество рассматриваемых факторов;
 m — количество рассматриваемых эффектов.

С учетом предварительной ортогонализации исходный полином (8) может быть представлен в следующем виде:

$$Y = A_0 \Psi_0(Z) + A_1 \Psi_1(Z) + \dots + A_m \Psi_m(Z) = \sum_{k=0}^m A_k \Psi_k(Z), \quad (9)$$

где $m+1$ — число членов уравнения регрессии.

Число $m+1$ в общем случае может быть равно числу всех n факторов во всех степенях от 0 до p плюс число всех $C_n^2 C_p^2$ парных взаимодействий, плюс соответствующее число тройных взаимодействий, плюс — и т. д. до исчерпания всего списка факторов. На практике, однако, имея в виду обработку пассивной контрольно-измерительной информации, степень p каждого фактора X_i не превышает 2, а число взаимодействий ограничивается парными, т. е. общее число членов уравнения регрессии, как правило, не

превышает $m+1 \leq 1+2n+C_n^2$. При этом для удобства работы следует произвести замену переменных и вместо эффектов факторов X_i и их взаимодействий различных порядков ввести единую переменную Z_k , $k=0...m$.

Следует отметить, что степень полинома $\Psi_k(Z)$ совпадает с номером столбца k рассматриваемых эффектов Z_k в матрице исходных данных. Тогда именно на полиномы $\Psi_k(Z)$ следует наложить условие ортогонализации

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^N \Psi_{kj}(Z)\Psi_{ij}(Z) = 0; \quad k, i = \overline{0, m}; \quad k > i; \\ \sum_{j=1}^N [\Psi_{kj}(Z)]^2 \neq 0, \end{cases} \quad (10)$$

где j — номер строки таблицы данных.

Решением системы уравнений (10) будет достаточно простая итеративная процедура

$$\begin{cases} \Psi_0(Z) \equiv 1; \\ \Psi_{kj}(Z) = Z_{kj} - \sum_{i=0}^{k-1} \xi_{ki} \Psi_{ij}(Z), \quad k = \overline{1, m}; \quad k > i, \end{cases} \quad (11)$$

где

$$\xi_{ki} = \frac{\sum_{j=1}^N Z_{kj} \cdot \Psi_{ij}(Z)}{\sum_{j=1}^N [\Psi_{ij}(Z)]^2}; \quad k, i = \overline{0, m}; \quad k > i. \quad (12)$$

Задача определения оценок коэффициентов b_k уравнения (8) сводится к нахождению коэффициентов A_k при ортогональных полиномах в (9) исходя из условий минимизации остаточной суммы квадратов —

$$SS = \sum_{j=1}^N \left[Y_j - \sum_{k=0}^m A_k \Psi_{kj}(Z) \right]^2 \rightarrow \min. \quad (13)$$

Дифференцируя (13) по каждому коэффициенту A_k и приравнявая результат дифференцирования к нулю, получаем систему $(m+1)$ линейных уравнений, решением которой будет выражение для расчета A_k

$$A_k = \frac{\sum_{j=1}^N Y_j \Psi_{kj}(Z)}{\sum_{j=1}^N [\Psi_{kj}(Z)]^2}; \quad k = \overline{0, m}. \quad (14)$$

Из полученной формулы видно, что все коэффициенты A_k определяются независимо друг от друга, т. к. рассматриваются на основе ортогональных полиномов различных порядков. Следовательно, вопрос о включении в уравнение (9) каждого коэффициента A_k может решаться в индивидуальном порядке по критерию Стьюдента. Для этого предварительно рассчитывается среднеквадратическое отклонение очередного коэффициента A_k :

$$S(A_k) = \sqrt{\frac{S^2(Y)}{\sum_{j=1}^N [\Psi_{kj}(Z)]^2}}, \quad (15)$$

где $S^2(Y)$ — средняя (или средневзвешенная) дисперсия выходной величины по неповторяющимся строкам плана (может быть определена специальными дублирующими экспериментами в любой точке изучаемой области факторного пространства, лучше всего в центре). В крайнем случае, для оценки средней дисперсии можно взять эмпирическую дисперсию распределения выходной величины, деленную на 4 (минимальное число равнодействующих составляющих, которые может иметь нормальное распределение).

Величина $S(A_k)$ подставляется в выражение для расчетного критерия Стьюдента —

$$t_k = \frac{|A_k|}{S(A_k)} \geq t_{\text{табл}}(q, v), \quad (16)$$

которая сравнивается с табличным при q уровне значимости и $v=N-1$ числе степеней свободы. При выполнении условия (16) коэффициент A_k признается значимым и должен быть включен в уравнение (9), в противном случае — нет.

Проверка адекватности уравнения (9) экспериментальным данным осуществляется, как обычно, с помощью критерия Фишера. В случае положительного решения можно совершить обратный переход в декартову систему координат, т. е. переходить к отысканию оценок b_k в уравнении (8).

Простейшим методом отыскания b_k является метод подстановок соответствующих конкретных значений $\Psi_k(Z)$ в (9) и приведение подобных членов. Выражения, стоящие перед каждым Z_k , и являются искомыми оценками коэффициентов b_k .

Необходимо отметить, что с ростом числа членов уравнения (9) поиск коэффициентов b_k усложняется. При этом следует обратить внимание на то обстоятельство, что если в уравнении (9) часть полиномов $\Psi_i(Z)$ оказались незначимыми, то это вовсе не означает, что соответствующие им коэффициенты b_i тоже окажутся незначимыми. Вполне возможно, что они войдут в конечное выражение модели в декартовых координатах, проникнув туда опосредовано за счет других членов:

$$b_k = A_k - \sum_{i=k+1}^m b_i \xi_{ik}; \quad i, k = \overline{m, 0}; \quad i > k. \quad (17)$$

Анализ особенностей метода наименьших квадратов с предварительной ортогонализацией факторов (МНКО), как в теоретическом плане, так и в плане практического применения, позволяет обратить внимание на следующее.

1. В условиях пассивного эксперимента оценки коэффициентов b_k , в отличие от A_k , являются смешанными. Однако по сравнению с МНК предложенный метод позволяет точно оценить независимый вклад каждого эффекта в соответствующий коэффициент b_k . Это обстоятельство обуславливает более высокую чувствительность МНКО по сравнению с МНК, которая

тем выше, чем больше количество исследуемых факторов, причем в этот список факторов могут входить как сильно-, так и слабодействующие.

2. Эффективность метода возрастает в случае расположения факторов в таблице данных в порядке убывания степени их влияния на выходную величину.

3. Расчет по МНКО в условиях активного плана является частным случаем определения коэффициентов регрессии по результатам пассивного эксперимента.

4. Поскольку оценки МНКО получены на основе тех же предпосылок, что и оценки МНК, то они обладают одинаковыми свойствами, т. е. несмещенности и эффективности.

5. Здесь же следует подчеркнуть, что поскольку МНК выведен для закона нормального распределения факторов и выходной величины, то, по-видимому, эти же требования в значительной степени относятся и к МНКО.

6. Существенной особенностью и преимуществом МНКО является то обстоятельство, что в силу перехода данных в заведомо ортогональную систему координат можно получать оценки коэффициентов и для коррелированных факторов, и для квадратных членов.

7. Другой существенной особенностью и преимуществом МНКО является то, что для получения модели не требуется слишком длинной таблицы исходных данных, как в ММСБ, лишь бы координаты точек факторного пространства были бы достаточно далеки друг от друга.

Пример 2. Используя данные табл. 1, найти математическую модель процента выхода годных кристаллов ИМС методом МНКО.
Решение. В силу большого объема табл. 1 расчет проводился на ПЭВМ по специальной программе. Получились следующие адекватные модели:

— в ортогональных полиномах:

$$\hat{Y} = 63,89 + 0,109\psi_1(Z) + 0,124\psi_2(Z);$$

— в декартовых координатах:

$$\hat{Y} = 3,77 + 0,113X_1 + 0,124X_2.$$

Напоминаем, что последняя модель дана в абсолютной (именованной) системе единиц, а все уравнение представляет собой обычное алгебраическое выражение, коэффициенты которого не являются весами факторов. Следует отметить также, что длина таблицы исходных данных не играет существенной роли в МНКО, разница только в трудоемкости обработки, однако при наличии ПЭВМ и соответствующего программного обеспечения трудоемкость получения модели для оператора практически одинакова (техника ручного расчета приведена в примере 4).

Комбинированный метод моделирования по пассивным данным (КММП)

Из сравнения ММСБ и МНКО ясно, что в случае достаточно большой выборки (длинной таблицы исходных пассивных данных) ММСБ может служить для выделения значимых факторов и оценки их весов, а следовательно, и приоритетов при управлении технологическим процессом. В то же время МНКО позволяет получать нужные зависимости более точно и в более привычной для цеховых работников алгебраической форме, однако точность эта зависит от

правильной ранжировки весов факторов, что обеспечивает как раз ММСБ. Другими словами, оба метода достаточно плотно переплетены между собой и дополняют друг друга. И мы стали искать метод, который объединял бы достоинства ММСБ и МНКО.

Таким методом может быть метод моделирования, основанный на применении метода МНКО, однако не по исходной, а по специально приготовленной таблице данных. Суть сводится к тому, что таблицу исходных многомерных экспериментальных данных сначала рассматривают, как в ММСБ, однако числовые значения факторов не кодируют, а оставляют как есть. Это позволяет по каждому фактору иметь строчную выборку, которую можно проверить на наличие скрытых грубых промахов и устранить их. Такую дополнительную очистку невозможно произвести никаким другим способом. Дополнительно очищенная таблица исходных данных затем может обрабатываться МНКО обычным порядком. Интуитивно ясно, что модель при этом получается более точной, с меньшим коридором разброса.

Следующий шаг — еще одно преобразование таблицы исходных данных: после расслоения первоначальной таблицы по методу ММСБ и дополнительной очистки строчных выборок по каждому фактору сформировать таблицу средних арифметических и дисперсий этих строчных выборок. Такая таблица позволяет произвести третью очистку данных — проверку на однородность строчных выборок. Тогда при гарантированной однородности строчных выборок факторов и выходной величины можно использовать таблицу строчных средних арифметических факторов и выходной величины как свернутую исходную таблицу данных для МНКО. Полученная на ее основе модель будет наилучшим образом отражать исследуемые процессы. Такой метод и есть комбинированный метод моделирования по пассивным данным (КММП).

Пример 3. Используя данные табл. 1 и результаты их расслоения по ММСБ (пример 1), найти математическую модель процента выхода годных кристаллов интегральных микросхем методом МНКО.

Решение. Прежде всего, используя граничные значения областей $x_k = \pm 1$, расслоим табл. 1 по образу табл. 2, оставив все числовые значения факторов. Для сокращения места приведем только две строки такой расслоенной таблицы.

j	X_1	X_2	X_3	Y
1	(-) 209; 202	(-) 237; 251	(-) 16,9; 16,6	56,0; 56,8
2	(-) 197; 207; 201; 195; 199; 181; 202; 194; 194	(-) 234; 242; 248; 202; 233; 242; 229; 240; 198	(0) 22,0; 21,5; 21,3; 24,7; 24,4; 22,0; 24,6; 24,9; 24,4	54,9; 57,0; 57,0; 51,0; 55,3; 54,0; 55,2; 55,6; 50,4
...

В каждой клетке такой таблицы образуется выборка, элементы которой следует подвергнуть проверке на наличие (отсутствие) грубых промахов (кроме уже очищенных клеток), при этом мы произведем их вторую очистку.

Теперь можно переходить к поиску адекватной модели по МНКО, которая будет выглядеть следующим образом:

— в ортогональных полиномах:

$$\hat{Y} = 63,92 + 0,114\psi_1(Z) + 0,120\psi_2(Z);$$

— в декартовых координатах:

$$\hat{Y} = 4,49 + 0,115X_1 + 0,120X_2.$$

Пример 4. Используя данные таблицы из примера 3, найти математическую модель процента выхода годных кристаллов интегральных микросхем методом КММП.

Решение. Сформируем таблицу данных для КММП. С этой целью вместо каждой выборки очищенной расслоенной таблицы примера 3 в соответствующую клетку поставим их средние арифметические и дисперсии. Для сокращения места приведем только две строки такой свернутой таблицы.

j	Объем строчной выборки, n_j	\bar{X}_{1j}	$S_{x_{1j}}^2$	\bar{X}_{2j}	$S_{x_{2j}}^2$	\bar{X}_{3j}	$S_{x_{3j}}^2$	\bar{Y}_j	$S_{Y_j}^2$
1	2	205,5	—	244,0	—	16,75	—	56,40	—
2	9	196,7	52,75	229,8	318,19	23,31	2,41	54,5	5,54
...

Полученная таблица позволяет произвести третью проверку качества экспериментальных данных — проверку на однородность выборок. Действительно, для каждого фактора и выходной величины имеем N выборок объема n_j , каждая со своими дисперсиями $S_{x_j}^2$ и $S_{Y_j}^2$, соответственно. Следовательно, можно определить однородность всех одноименных выборок по критерию Бартлетта и вычислить средневзвешенную дисперсию S_p^2 . В случае отрицательного ответа выявленную неоднородность следует устранить.

Очищенная от всех выявленных грубых промахов свернутая таблица исходных экспериментальных данных, а также их обработка по формулам (10) — (16) представлены в **табл. 4**.

Вспомогательные коэффициенты ξ_{ki} :

k	i		
	0	1	2
1	238,6		
2	264,5	0,1306	
3	23,06	0,0018	0,0158

Расчет оценок коэффициентов регрессии:

	Z_0	Z_1	Z_2	Z_3
A_k	64,50	0,117	0,0541	-0,0166
$S\{A_k\}$	0,552	0,0123	0,0104	0,129
t_k	117	9,58	5,18	0,128

Тогда уравнение регрессии (модель) в пространстве ортогональных полиномов имеет вид

$$\hat{Y} = 64,50 + 0,117\psi_1(Z) + 0,054\psi_2(Z).$$

Проверка на адекватность по Фишеру —

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_p^2} = \frac{7,49}{8,23} < 1$$

четко указывает на адекватность модели экспериментальным данным. Обратный переход в пространство декартовых координат дает уравнение

$$\hat{Y} = 23,92 + 0,110X_1 + 0,054X_2.$$

Таблица 4

Очищенные и свернутые пассивные экспериментальные данные и их обработка методом МНКО

j	Код			Средние данные в абсолютных единицах						Расчет полиномов			Расчет адекватности	
	x_1	x_2	x_3	\bar{X}_{1j}	\bar{X}_{2j}	\bar{X}_{3j}	n_j	\bar{Y}_j	$S_{Y_j}^2$	$\psi_{1j}(Z)$	$\psi_{2j}(Z)$	$\psi_{3j}(Z)$	\hat{Y}_j	$(\bar{Y}_j - \hat{Y}_j)^2$
1	-	-	-	205,5	244,0	16,75	2	56,40	—	-33,12	-216,1	-2,83	48,93	55,87
2	-	-	0	197,0	233,75	23,18	8	55,00	3,64	-41,62	-25,29	0,59	58,26	10,60
3	-	-	+	197,5	233,0	26,15	2	55,30	—	-41,12	-26,10	3,58	58,27	8,82
4	-	0	-	176,3	273,8	18,92	13	56,91	4,62	-62,31	17,44	-4,30	58,14	1,52
5	-	0	0	188,2	277,4	22,54	8	59,24	6,73	-50,37	19,48	-0,74	59,65	0,17
6	-	0	+	205,0	281,0	30,60	1	62,70	—	-33,62	20,92	7,27	61,69	1,01
7	-	+	-	169,9	303,7	19,59	7	59,93	10,8	-68,77	48,22	-4,11	59,05	0,77
8	-	+	0	161,6	302,2	23,12	5	59,20	7,94	-77,02	47,79	-0,56	58,06	1,30
9	-	+	+	182,1	320,9	26,27	12	64,32	3,4	-56,54	63,83	2,30	61,33	8,93
10	0	-	-	236,0	232,25	18,49	8	58,81	3,63	-2,62	-31,88	-4,06	62,47	13,37
11	0	-	0	235,4	211,3	23,47	7	56,81	9,76	-3,19	-52,77	1,25	61,27	19,87
12	0	-	+	234,2	237,2	27,04	5	60,34	6,17	-4,42	-26,69	4,41	62,54	4,83
13	0	0	-	238,6	266,2	19,0	9	63,34	5,34	-0,07	1,76	-4,09	-64,59	1,55
14	0	0	0	236,7	267,1	22,75	11	63,74	9,67	-1,90	2,87	-0,35	64,43	0,49
15	0	0	+	220,0	268,8	27,70	6	62,60	2,29	-18,62	6,79	4,57	62,69	0,01
16	0	+	-	226,5	300,5	17,50	2	65,90	—	-12,12	37,61	-6,13	65,12	0,62
17	0	+	0	241,0	309,4	23,52	5	69,54	9,04	2,38	44,62	-0,25	67,19	5,51
18	0	+	+	251,0	320,0	25,90	1	72,30	—	12,38	53,92	1,96	68,87	11,78
19	+	-	-	284,3	241,0	17,97	3	65,53	16,5	45,71	-29,44	-4,71	68,26	7,46
20	+	-	0	278,0	240,0	24,30	1	65,50	—	39,38	-29,61	1,64	67,51	4,05
21	+	-	+	274,5	230,0	31,27	2	64,75	—	36,88	-39,28	8,24	66,70	3,79
22	+	0	-	295,5	277,0	15,25	2	70,95	—	56,88	5,11	-8,00	71,44	0,24
23	+	0	0	293,8	273,7	22,97	12	71,30	12,6	55,21	1,99	-0,23	71,08	0,05
24	+	0	+	291,0	270,0	30,80	2	71,50	—	52,38	-1,31	7,66	70,57	0,87
25	+	+	-	313,8	300,0	18,20	5	76,28	10,1	75,18	25,72	-5,41	74,70	2,49
26	+	+	0	308,3	308,9	23,64	9	75,61	23,9	69,71	35,32	-0,10	74,58	1,06
27	+	+	+	300,0	317,6	26,28	5	77,72	21,1	61,38	45,12	2,39	74,13	12,86

Оценка качества моделей

Как известно, на одном и том же массиве исходных данных можно построить несколько математических моделей, причем необязательно с одним и тем же перечнем значимых факторов. В силу адекватности все эти модели имеют право на существование, однако точность описания или выходной величины различна. Наилучшей оценкой качества модели признается ее информационная емкость, т. е. количество информации, которое модель выбрала из таблицы данных [3, с. 241—246].

Пример 5. Рассчитать информационные емкости адекватных математических моделей, полученных на основе одной исходной таблицы пассивных экспериментальных данных.

Решение. В примерах 1 — 4 найдены адекватные математические модели, полученные при обработке экспериментальных данных табл. 1 четырьмя различными методами. Пользуясь подробной методикой расчета, приведенной в [3], определим информационные емкости упомянутых четырех моделей и для наглядности сведем результаты в таблицу.

Табл. 1 пассивных данных	Метод	Источник	Математическая модель	Система координат	Информационная емкость, %
Первичная очистка	ММСБ	Пример 1	$\hat{Y} = 63,94 + 6,50x_1 + 5,25x_2 + 2,40x_3 + 2,68x_1x_2$	Относительная декартова	12,3
			Исходная таблица ММСБ без кодировки факторов	МНКО	
То же после вторичной очистки	МНКО	Пример 3	$\hat{Y} = 3,77 + 0,113x_1 + 0,124x_2$		Абсолютная декартова
			$\hat{Y} = 63,92 + 0,114\psi_1(Z) + 0,120\psi_2(Z)$	Ортогональные полиномы	
Свернутая таблица ММСБ после проверки на однородность	КММП	Пример 4	$\hat{Y} = 4,49 + 0,115x_1 + 0,120x_2$	Абсолютная декартова	62,2
			$\hat{Y} = 64,50 + 0,117\psi_1(Z) + 0,054\psi_2(Z)$	Ортогональные полиномы	
			$\hat{Y} = 23,92 + 0,110x_1 + 0,054x_2$	Абсолютная декартова	77,7

Следует обратить внимание, что вторичная очистка данных от грубых промахов имеет принципиальное значение для информационной емкости (следовательно, и для точности, эффективности) модели, а метод КММП по качеству модели сравнялся с активными методами планирования типа полного факторного эксперимента.

Выводы

Предложенные в этой статье методы математического моделирования по пассивным данным позволяют использовать уже имеющуюся накопленную контрольно-измерительную информацию, полу-

ченную при пооперационном или финишном контроле, для нахождения математической модели конкретного технологического процесса (ТП). Это означает, что без дополнительных финансовых и других затрат технолог может:

1) получить математическую модель (ММ), пригодную для управления ТП, и, в конечном счете, оптимизировать его по максимуму выхода годных изделий (на практике на ряде крупнейших предприятий при моделировании ТП производства кристаллов ИМС удалось увеличить съём годных кристаллов в 2—4 раза при том же исходном запуске);

2) получить список параметров изделия (факторов, вошедших в ММ), по которым только и стоит производить отбраковочный контроль, что позволит в 2—5 раз снизить количество контрольных операций и тем самым уменьшить производственные затраты (на практике там же удалось снизить количество отбраковочных контрольных операций с 35—40 до 3—6);

3) получить ММ неблагоприятных технологических операций и тем самым устранить неоднородность процесса с одновременным значительным повышением коэффициента точности тиража, что дает дополнительное количество годных изделий;

4) построить комплексную информационную измерительную систему, совмещенную с системой статистического регулирования и оптимизации ТП, адаптирующуюся к изменениям условий производства, что позволяет дать документальную оценку качества самого ТП.

Все изложенные методы получены и опробованы в научно-исследовательской лаборатории «Математическое моделирование» Приднестровского государственного университета им. Т. Г. Шевченко. Разработан пакет из 19 компьютерных программ в интегрированной среде визуального программирования BORLAND C++ BUILDER 5.0 как приложение для ОС WINDOWS. Пакет позволяет решить все задачи моделирования технологических процессов при производстве кристаллов ИМС, однако может легко адаптироваться к решению аналогичных задач моделирования по пассивным данным в любой отрасли науки и техники.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий.— М.: Наука, 1976.
2. Эльясберг П. Е. Измерительная информация: Сколько ее нужно? Как ее обрабатывать?— М.: Наука, 1983.
3. Долгов Ю. А. Статистическое моделирование.— Тирасполь: ПГУ, 2002.
4. Дружинин Г. В. Методы и оценки прогнозирования качества.— М.: Радио и связь, 1982.
5. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: методы обработки данных.— М.: Мир, 1980.
6. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул.— М.: Высшая школа, 1988.
7. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений.— М.: Наука, 1971.

К. т. н. Б. А. ДЕМЬЯНЧУК

Украина, Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова
E-mail: p-e@tm.odessa.ua

Дата поступления в редакцию
21.10 2003 г. — 10.03 2004 г.

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

МИКРОВОЛНОВЫЙ НАГРЕВ: ОСОБЕННОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ

Предложен способ модернизации технологии микроволнового нагрева диэлектрических материалов. Обосновываются преимущества нерезонансной системы нагрева перед традиционной, резонансной.

Технология микроволнового нагрева с целью отверждения, сушки, коррекции свойств различных диэлектрических материалов или полимерных композитов с токопроводящими наполнителями, в целом, относится к разряду энергосберегающих и повышающих качество продукции [1—3]. Благодаря совпадению направлений убывания (т. е. градиентов) температуры, давления паров, влажности обрабатываемых материалов при таком их нагреве скорость обработки увеличивается в два—три раза. Подобного совпадения в принципе невозможно достичь не только в конвективных, но и в нагревателях инфракрасного или ультрафиолетового диапазона, поскольку волны лишь микроволнового диапазона имеют достаточную (для внутреннего нагрева) глубину проникновения в обрабатываемую продукцию [3, 4].

Однако для традиционной технологии микроволнового нагрева это утверждение справедливо лишь при воздействии в щадящем режиме, когда обеспечивается выравнивание интенсивности поля нагрева в обрабатываемой продукции за счет классической теплопередачи. Специфические особенности действующих при этом механизмов ранее уже обсуждались [5]. Здесь напомним лишь, что именно по причине опасности для человека фоновых излучений нагрев традиционно осуществляют в закрытых металлических и, значит, резонансных камерах. Это приводит, как известно, к проблемам обработки продукции на потоке, к локальным ее перегревам и недогревам из-за “стоячей волны” в объеме камеры, к снижению энергоэкономичности процесса нагрева, например, из-за уходов собственной частоты резонансной камеры при ее недогрузке от частоты микроволнового генератора, “нагруженного” на камеру.

Локальные перегревы и недогревы обрабатываемой продукции в традиционной технологии микроволнового нагрева считаются особенно труднопреодолимым препятствием при широком применении этой технологии — например, для гарантированной стерилизации продукции, для пробоподготовки и для микроволнового синтеза новых материалов [6].

Целью данной статьи является не только конкретизация давно назревшей проблемы модернизации технологии микроволнового нагрева, но, прежде всего, обсуждение возможных путей и особенностей ее решения.

Составными частями проблемы создания новых микроволновых нагревателей являются:

- а) научная и экспериментальная разработка основ модернизации с целью создания микроволновых камер равномерного и СВЧ безопасного нагрева;
- б) исследование термоэлектродинамических свойств новых систем нагрева;
- в) оценка перспектив внедрения новых технологий микроволнового нагрева производственного и бытового назначения.

Отмеченные составляющие указанной триединой проблемы являются следствием трех существенных противоречий.

Во-первых, в настоящее время не существует научно обоснованных принципов построения микроволновых систем равномерного и СВЧ безопасного нагрева, в то время как специалистам по электродинамике хорошо известны общие рекомендации науки и практики, направленные на обеспечение режима бегущей волны в волноводных линиях передачи электромагнитных колебаний, а также рекомендации по ослаблению паразитных излучений в таких линиях [2, 3].

Во-вторых, несмотря на блестящие проработки множеством ученых отдельно взятых научных направлений, а именно, электродинамики, термодинамики, физики твердого тела, физики полупроводников, физики полимерных композитов, до настоящего времени не существует комплексного исследования, нацеленного на развитие специфического и важного для теории и практики направления, назовем его микротермоэлектродинамикой нагрева.

Не затрагивая общеизвестных издержек узкопрофильной ориентации при подготовке специалистов, в результате которой специалисты по электродинамике имеют ограниченное представление о молекулярной физике и наоборот, отметим здесь, что сетования более чем 40-летней давности по этому поводу известного ученого, по-существу, основоположника микроэлектродинамики А. Хипшеля, остались до наших дней, по-видимому, без достойного внимания [1]. В этом плане исследование термоэлектродинамических, электродинамических свойств нетрадиционного микроволнового нагрева представляется оправданным и принципиально необходимым.

В-третьих, явные издержки традиционного микроволнового нагрева, несмотря на его неоспоримые достоинства, не привели к его широкому внедрению в производство. Понятно, что, скорее всего, это явилось следствием высокой опасности для оператора традиционной микроволновой обработки продукции на потоке. Зато там, где поток не применяется, в быту, преимущества указанного нагрева, несмотря на его явные недостатки, обеспечили массовое внедрение, нуждающееся в настоящее время в придании ему нового дыхания.

Естественной в этой ситуации и перспективной представляется попытка дальнейшего развития достижений многих десятков, сотен и тысяч разработчиков и производителей, предложив целой индустрии и потребителям изменить ориентацию предпочтений на нечто более совершенное, но с риском солидных издержек на нарушение стационарности установившегося процесса производства, сбыта и эксплуатации производственного микроволнового оборудования.

Декомпозиция путей совершенствования технологии микроволнового нагрева в общем виде схематически представлена на **рис. 1**.

Принципы модернизации технологии микроволнового нагрева сводятся, как показывают исследования, проведенные автором, к следующей совокупности приемов:

- нейтрализация резонансных свойств камеры путем концентрации энергии в объеме обрабатываемого образца диэлектрических материалов и преобразования балластной электромагнитной энергии в тепловую;
- утилизация тепловой энергии, преобразованной из балластной электромагнитной, с помощью теплообменника;
- согласование размеров раскрытия излучателя с поперечными размерами обрабатываемого образца или потока продукции;
- согласование размеров камеры с поперечными размерами обрабатываемого образца или потока продукции;

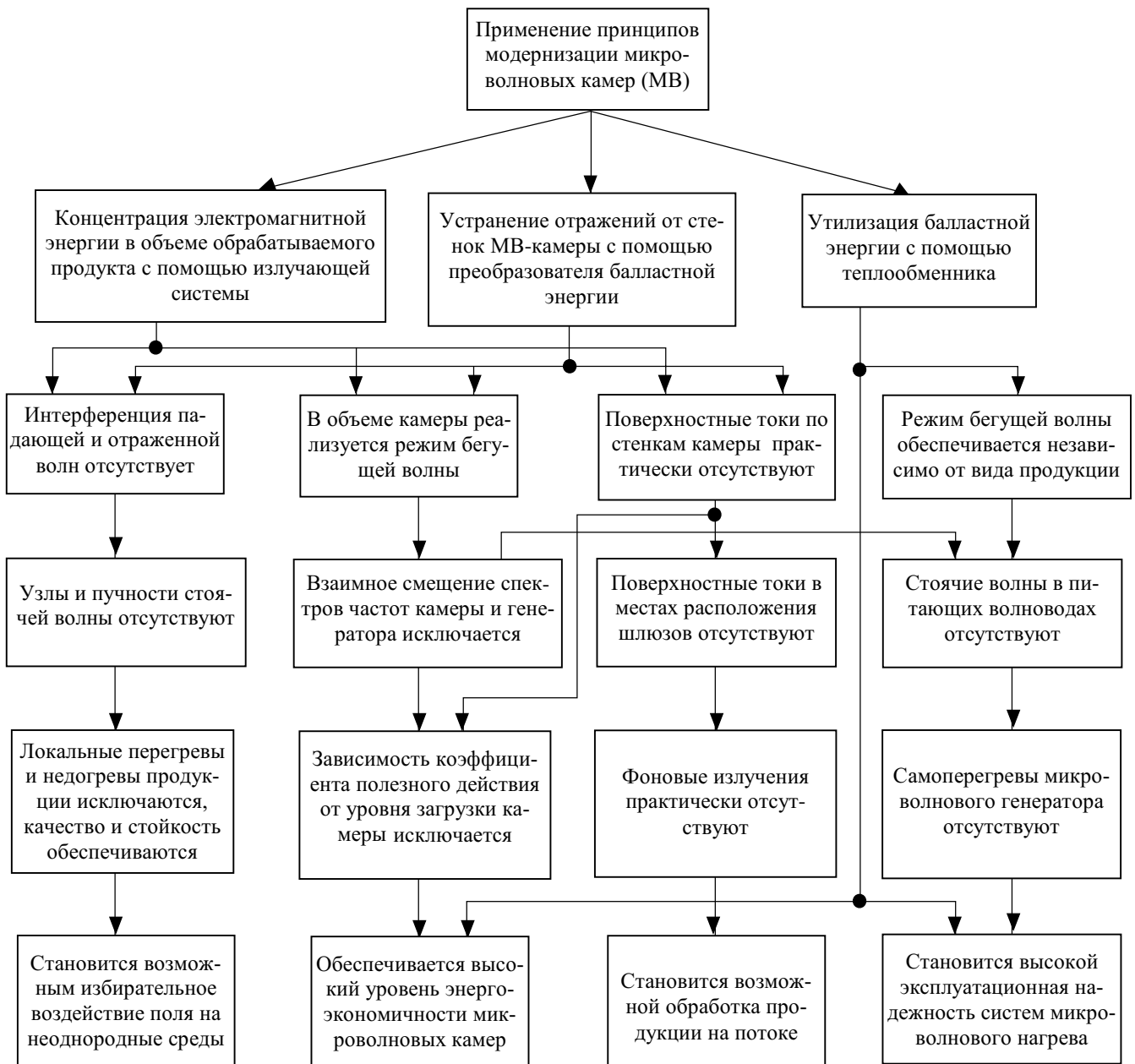


Рис. 1. Декомпозиция физико-технических путей решения проблемы улучшения качества микроволновых нагревателей

— согласование продольного размера обрабатываемых образцов материалов с ожидаемой глубиной проникновения электромагнитного поля в эти диэлектрические материалы;

— удаление раскрыва излучателя камеры от поверхности обрабатываемых образцов на расстояние, не меньшее, чем расстояние до ближней границы дальней зоны распространения электромагнитных колебаний.

Применение информационно-синергетического подхода к задаче определения необходимой и достаточной совокупности новых узлов системы микроволнового нагрева, обеспечивающей достижение целей модернизации, подтвердило однозначный вывод о том, что требуемое качество новой системы нагрева может быть достигнуто при условии введения в состав традиционной системы одновременно трех ее новых узлов: узла согласованной концентрации электромагнитного поля, узла преобразования балластной электромагнитной энергии в тепловую, узла теплообмена и утилизации тепловой энергии.

При соблюдении указанных принципов модернизации типовых микроволновых камер, например, камер бытового назначения известных зарубежных фирм, имеют место положительные эффекты, установленные нами экспериментально:

а) относительная величина “ухода” КПД камеры (из-за ее недогрузки) от его среднего значения уменьшается на 70% (с 49% до 15%), а относительное увеличение среднего (по нескольким уровням загрузки камеры) значения КПД составляет 28%;

б) показатель локальной равномерности нагрева продукции (за счет отсутствия “стоячих” волн в камере) увеличивается более чем на 80%;

в) плотность потока мощности фоновых излучений камеры, модернизированной в полном объеме, уменьшается более чем в 10 раз.

Нерезонансные камеры производственного назначения, предложенные автором в 1994—2002 гг., позволяют обеспечить интегрально- и локально-равномерное поле нагрева продукции, СВЧ-безопасность, экономичность процесса, режим “бегущей волны”, а следовательно, и надежность блока СВЧ-генератора. Энергия концентрируется, в основном, в объеме нагреваемого продукта, не поглощенное продуктом электромагнитное поле диссипируется балластным преобразователем — покрытием для камеры и, с помощью блока утилизации балластной электромагнитной энергии, способствует постоянному за время экспозиции интегрально-равномерному нагреву в нерезонансной рабочей камере. При этом отсутствует принципиальная необходимость следить за точным соблюдением номинального уровня загрузки камеры. СВЧ-генератор, всегда работающий на нерезонансную нагрузку в режиме “бегущей волны”, не перегревается.

Рассмотрим особенности и свойства новой камеры, которая отличается от традиционных резонансных камер высоким уровнем интегральной и локальной равномерности поля, малым уровнем фоновых излучений через технологические шлюзы, а также энергоэкономичностью за счет отсутствия взаимных уходных частот камеры и генератора, за счет кон-

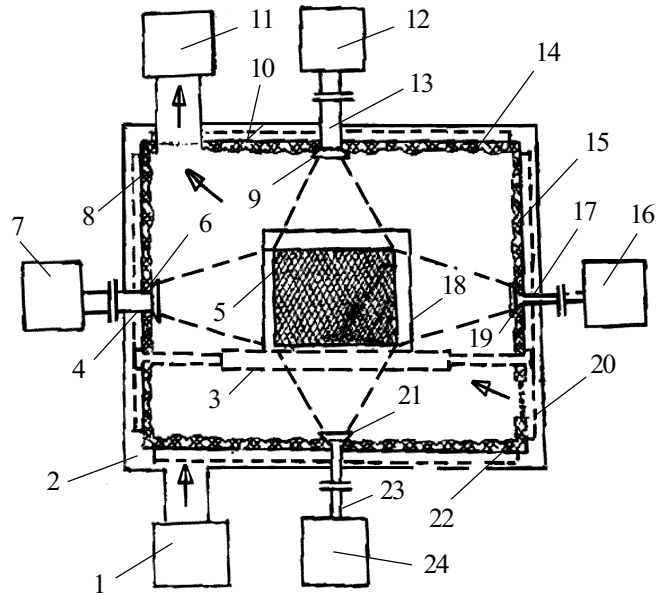


Рис. 2. Нерезонансная камера с согласованной концентрацией поля и конвективной утилизацией балластной энергии:

1 — нагнетательный вентилятор; 2 — воздуховоды; 3 — диэлектрический транспортер; 4, 13, 17, 23 — волноводы; 5 — обрабатываемый образец; 6, 9, 19, 21 — излучатели; 7, 12, 16, 24 — СВЧ-генераторы; 8, 14, 15, 22 — балластные преобразователи; 10 — корпус камеры; 11 — вытяжной вентилятор; 18 — шлюзы загрузки и выгрузки; 20 — теплообменные пластины

центрации энергии в объеме нагреваемого продукта и утилизации энергии поля при ее избыточности.

Установка для СВЧ-обработки диэлектрических материалов, предложенная в 1994 г. и усовершенствованная в 1999 г., схематически представлена на рис. 2 [7, 8]. Она предназначена для нагрева продукции на потоке либо в статическом режиме.

Камера представляет собой конструкцию проходного типа. Тип шлюзов и транспортера камеры зависит, естественно, от вида обрабатываемых материалов. Например, для формованных материалов транспортер является ленточным, а шлюзы имеют вид полого, закрытого с торцов цилиндра с перекидным клапаном в виде трехлопастного ротора. При обработке сыпучих материалов транспортер является, например, вибрационно-лотковым, а шлюзы имеют в своем составе заборный желоб, запредельный волновод и диэлектрический направляющий желоб.

Такая камера обеспечивает:

а) *равномерный нагрев* обрабатываемых диэлектрических материалов — даже в том случае, если они имеют высокую удельную электропроводность, низкую теплопроводность и обрабатываются в толстом слое. При этом исключаются и локальные перегревы в обрабатываемом объеме, и недогревы материалов, что позволяет, например, сохранять химический состав и гарантировать качество обрабатываемой продукции. Кроме того, при этом возможна реализация избирательного гарантированного воздействия электромагнитным полем на составляющие неоднородной среды, отличающиеся удельной электропроводностью и диэлектрической проницаемостью (например, в виде сыпучей продукции и вкраплений с более высокой удельной электропроводностью и более

низкой диэлектрической проницаемостью), которые должны быть нагреты до более высокой температуры. Известно, что отношение значений удельной (объемной) плотности мощности P , диссипируемой в каждой из двух составляющих такой среды, имеющих соответствующие удельную электропроводность σ и диэлектрическую проницаемость ϵ , равняется

$$\frac{P_2^+}{P_1^+} = \frac{\sigma_2 \epsilon_1^2}{\sigma_1 \epsilon_2^2},$$

однако реализовать эту избирательность нагрева в каждой точке в объеме образца возможно лишь в предлагаемой камере, в объеме которой отсутствуют минимумы и максимумы электромагнитного поля;

б) *возможность обработки материалов на потоке* при безопасном уровне плотности потока мощности через шлюзы загрузки и выгрузки — как на холостом ходу, так и в установившемся рабочем режиме. При этом открываются возможности более широкого промышленного применения микроволновых нагревателей. В целом это способствует разрешению традиционной проблемы, порождаемой противоречием между необходимостью, с одной стороны, значительно увеличивать объемы обрабатываемой продукции (с целью повышения рентабельности применения микроволновых технологий) и опасностью, с другой стороны, наращивать мощности микроволновых систем поточной обработки из-за недопустимых (по санитарным нормам) фоновых излучений таких традиционных систем. Понятно, что отражения от потока продукции увеличивают фон, однако оказываются достаточными меры, подобные тем, что указывались ранее: ротор, заградительный волновод шлюза или радиозащитные уплотнения;

в) *независимость коэффициента полезного использования СВЧ-энергии от степени загрузки камеры и вида загружаемой продукции*. Поддержание КПД микроволнового оборудования на установленном разработчиком высоком уровне независимо от ритмичности и уровня загрузки, а также от однородности загружаемой продукции, приводит, прежде всего, к возможности интенсификации процесса обработки, по сравнению с традиционным, именно в случаях, когда загрузка отличается от номинала, что всегда актуально и в быту, и в условиях производства. Кроме того, это способствует ослаблению требований к системе контроля и автоматизированного управления процессом обработки продукции при сохранении высокого качества обработки и, следовательно, требуемого качества выходного продукта за счет гарантированной предсказуемости микроволнового и, следовательно, теплового воздействия на продукт в соответствии с технологическим режимом, обрабатываемым, как правило, на этапе испытания системы и ввода ее в эксплуатацию;

г) *высокую эксплуатационную надежность* микроволновой нерезонансной системы за счет отсутствия “стоячих волн” в питающих волноводах и, следовательно, за счет исключения самоперегрева и выводов из строя микроволновых генераторов и наиболее сложных, наукоемких и дорогостоящих узлов, таких

как блоки высоковольтного питания и стабилизации питающих напряжений, подаваемых на катодный электрод микроволнового генератора. Это особенно важно и потому, что наиболее часто применяемые на практике магнетронные генераторы весьма критичны к уровню их нагрузки, к уровню коэффициента “стоячей волны” в питающем волноводе, причем чем выше этот уровень, тем ниже уровень выходной мощности и выше вероятность самоперегрева генератора, следовательно, выше эксплуатационные энергозатраты — не только на обработку продукции, но и на вынужденные, значительно более частые, замены самих генераторов и блоков их питания, составляющих основную долю высокой стоимости микроволновых систем нагрева. Заметим здесь, что стандартная цена блока генерации (т. е. с учетом выпрямителя и стабилизатора) мощностью 1,0 кВт примерно равняется 1000 евро;

д) *экономии электроэнергии* за счет ее концентрации в объеме продукта, согласованной с линейными размерами образца или потока обрабатываемой продукции. Этот показатель (назовем его энергоэкономичностью новой камеры), механизмы повышения энергоэкономичности камеры нуждаются в пояснении.

Таких механизмов несколько, и почти все они ранее затрагивались.

Во-первых, микроволновый генератор работает в номинальном для него режиме “бегущей волны” в питающем волноводе, поэтому вырабатывает электромагнитные колебания максимальной полезной мощности при типовом значении потребляемой мощности, кроме того, при этом режиме энергозатраты на его самоперегрев отсутствуют.

Во-вторых, поскольку камера не является резонансной, то, независимо от уровня ее загрузки и вида загружаемой в нее продукции, ее собственная частота остается неизменной (применив балластное покрытие, получаем неограниченную практически ширину рабочей полосы частот камеры), вся энергия генераторов попадает в камеру беспрепятственно.

В-третьих, при концентрации электромагнитной энергии в объеме продукта, например, в узком угловом секторе θ , прежде всего, увеличивается плотность ρ_s потока энергии, попадающей лишь на продукт с учетом площади его поперечного сечения; эта плотность, как известно, пропорциональна квадрату электрической напряженности E^2 электромагнитного поля, падающего на обрабатываемый продукт, последнее же (т. е. E^2) пропорционально удельной (объемной) плотности мощности P^+ , нагревающей продукт с более высокой скоростью изменения его температуры dT/dt , т. е. имеем в этом случае цепочку пропорциональных (\sim) зависимостей в виде

$$\Theta^{-1} \sim \rho_s \sim E^2 \sim P^+ \sim dT/dt,$$

благоприятствующую энергоэкономичности нового микроволнового нагревателя. Кроме того, концентрация поля практически исключает его прямое попадание на стенки и, следовательно, значительно ослабляет потери на протекание поверхностных токов по стенкам камеры, что, из-за многократных переотражений в обычной, резонансной, камере может иметь значи-

тельную величину (подчеркнем, что в данном конкретном месте речь идет о традиционной камере с чистыми металлическими стенками).

Наконец, в-четвертых, утилизация энергии электромагнитного поля ослабляет зависимость потерь электромагнитной энергии от отражающих и поглощающих характеристик обрабатываемой продукции, а также зависимость потерь от толщины слоя обрабатываемого потока и от уровня влагосодержания продукта, поскольку энергия электромагнитного поля, не диссипированная в обрабатываемом материале, преобразуется в балластном покрытии в тепловую, которая снова подается (с помощью системы теплообмена) в камеру для дополнительного, в данном случае конвективного, нагрева обрабатываемого продукта. Именно указанные факторы предопределяют основную долю показателя энергоэкономичности новой камеры, представленной на рис. 2.

Следует еще раз подчеркнуть необходимость и достаточность реализации в новой камере всей совокупности принципов ее построения для получения изложенных выше преимуществ, т. е. более совершенных характеристик новой камеры. Важно также отметить, что, если хотя бы один из принципов построения новой камеры не выполняется или почти не выполняется, то одна или несколько ее характеристик могут уступать характеристикам даже традиционной микроволновой камеры. В справедливости этого утверждения нетрудно убедиться с помощью логического анализа. Это же подтверждается расчетами и

экспериментально. Именно поэтому приходится рекомендовать вполне серьезно: «Модернизировать все или ничего — третьего не дано».

В заключение отметим возможности новых систем микроволнового нагрева в стимулировании освоения технологий, ранее не существовавших. Речь идет, например, о микроволновом вспенивании гранулированных полимерных материалов, о стерилизации продукции при более низкой температуре, о получении неравновесных плазменных образований в объеме камеры и др., являющихся предметом отдельного обсуждения.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Хиппель А. Р. Диэлектрики и волны.— М.: ИЛ, 1960.
2. Саусворт Дж. К. Принципы и применения волноводной передачи.— М.: Сов. радио, 1955.
3. Княжевская Г. С., Фирсова М. Г., Килькеев Р. Ш. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов.— Л.: Машиностроение, 1989.
4. Калинин Л. Г. Микроволновые технологии в агропромышленном комплексе, промышленности и медицине // Микроволновые технологии в народном хозяйстве. Внедрение. Проблемы. Перспективы. (Киев—Одесса).— 2000.— Вып. 2—3.— С. 11—15.
5. Демьянчук Б. А., Оленев Н. В. Итоги и перспективы развития технологии микроволнового нагрева диэлектрических материалов // Технологии и конструирование в электронной аппаратуре.— 2003.— № 4.— С. 57—60.
6. Кингстон Г. М., Джесси Л. Б. Пробоподготовка в микроволновых печах.— М.: Мир, 1991.
7. Пат. 2126606 России. Установка для СВЧ-обработки диэлектрических материалов // Б. А. Демьянчук, В. Е. Полищук.— 1999.
8. Пат. 34520 Украины. Спосіб мікрохвильового нагріву / Б. О. Дем'яничук, Б. Л. Бахчеван.— 2001.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Петрухин Г. Н. (под ред.). ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ И РАДИОТЕХНИКИ.— М.: Радио и связь, 2003.— 520 с.

Описываются различные виды электронных приборов и устройства на их основе, дается их классификация, приводятся их основные характеристики. Излагаются основы теории электрических сигналов и радиотехнических операций (усиление, генерирование, модуляция, фильтрация и т. п.).

Для студентов вузов, обучающихся по специальностям «Проектирование и технология РЭС», «Конструирование и технология ЭВС», «Средства связи с подвижными объектами», «Информационная безопасность телекоммутиационных систем», «Комплексное обеспечение безопасности автоматизированных систем».

Учебное пособие для вузов.

НОВЫЕ КНИГИ



Урлич Ю. М., Данилин Н. С. УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОЙ ОТКРЫТОЙ ЭКОНОМИКИ.— М.: "МАКС Пресс", 2003.— 204 с.

В монографии рассмотрен комплекс проблем управления качеством космической радиоэлектронной аппаратуры в условиях предстоящего вступления России во Всемирную торговую организацию — ВТО.

Представлено поэтапное сравнение методов обеспечения качества космического приборостроения, включая сертификационные испытания в Европейском Космическом Агентстве — ESA и в испытательных центрах Росавиакосмоса.

Приведены результаты гармонизации испытательных систем Росавиакосмоса и ESA для электронных компонентов новых российских космических телекоммутиаций.



К. т. н. М. Д. СКУБИЛИН, к. т. н. А. В. ПИСЬМЕНОВ,
к. т. н. Б. А. ГУСЕВ

Россия, г. Таганрог, Таганрогский гос. радиотехнический университет,
НИИ связи
E-mail: scubilin@hotbox.ru

Дата поступления в редакцию
29.12 2003 г. — 09.02 2004 г.

Оппонент д-р О. ГИЛЕНЕ
(Институт химии, г. Вильнюс)

ПРОБЛЕМЫ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ГАЛЬВАНОТЕХНОЛОГИИ

Показана возможность создания экологически чистого производства печатных плат и гибридных гибких ИС без необходимости возведения очистных сооружений.

В гальваническом производстве с устаревшей технологией в расчете на 1 м² покрытия теряется от 0,2 до 2 г цветных металлов, многие из которых стали дефицитными во всем мире. Потери металла с промывными водами соизмеримы с расходом металла на покрытие, а в случае использования хрома превышают его в 5—8 раз. Только в промышленности нынешнего СНГ ежегодно сбрасывалось около 3 км³ сточных вод, содержащих более 5000 тонн металлов [1].

Гальваническое производство в электронном приборостроении продолжает оставаться одним из основных источников загрязнения окружающей среды токсичными соединениями различных металлов, что представляется недопустимым с экологической точки зрения и нерациональным с точки зрения ресурсосбережения.

В частности, фольгированные подложки из гетинакса и стеклотекстолита для печатных плат (ПП) имеют слой меди толщиной 20—50 мкм. На конечном этапе изготовления ПП проводники и контактные площадки занимают не более 25—30% поверхности, а 70—75% металла переходит в раствор в виде химических отходов. В первом приближении это составляет 0,5—1,0 кг с 1 м² поверхности. Сюда следует добавить отходы от химической металлизации отверстий в жестких платах (или отходы от химического травления полиимида в гибких платах).

К тому же в травильных цехах образуются и вредные вещества. Большая часть растворов для травления ПП является опасной для окружающей среды. С одной стороны, при приготовлении растворов и их использовании выделяются вредные газы (например, аммиак из щелочных растворов), с другой стороны, отработанные травильные растворы, попадая в сточные воды, могут значительно увеличить концентрацию токсикантов в стоках.

Усилия разработчиков современных технологий травления плат печатного монтажа направлены на увеличение экологической чистоты процессов травления с регенерацией отработанных растворов. С этой точки зрения, как показывает опыт, наиболее пригодны хлорно-железные и хлорно-медные растворы.

Существуют способы, по которым регенерация может происходить как периодически, так и в рецикле с процессом травления ПП [2].

Для создания малоотходного гальванического производства требуется значительное изменение технологий травления поверхности и нанесения гальванопокрытий, организация рациональной системы водопотребления и разработка высокоэффективных методов локальной очистки. Предпочтительны технологические методы, при которых достигается минимальный расход реагентов, максимальные эффект очистки, возврат воды и металла в производство.

В результате химических методов в виде отходов выделяются осадки, содержащие токсичные тяжелые металлы. Нерастворимые шламы-отходы гальванического производства могут утилизироваться в строительных материалах (кирпич, асфальто-бетонные смеси, черепица, пигменты для приготовления красок и т. п.). Однако тяжелые металлы способны вымываться из полученных строительных продуктов и загрязнять окружающую среду [3].

Для полного и рационального использования воды в процессах травления приемлемы методы реагентной очистки (в т. ч. с использованием флокулянтов), флотации, отстаивания, фильтрации, сорбции, ионного обмена, гальванокоагуляции. Способ отличается универсальностью, надежностью, повышением степени очистки, существенным сокращением энергозатрат и затрат реагентов, упрощением технического обслуживания; повышением эффективности работы реагентной схемы очистки сточных вод гальванического производства путем введения в обрабатываемые стоки раствора анионного флокулянта, что позволяет уменьшить остаточные концентрации тяжелых металлов в 2—20 раз; упрощением технологии и оборудования для механического обезвоживания осадков, образующихся при очистке сточных вод гальванических производств, с целью уменьшения их объемов в 7—30 раз.

Одним из перспективных методов переработки гальванических стоков, обеспечивающих полностью замкнутый цикл водопотребления и исключающий попадание стоков в природные водоемы, является упаривание стоков с получением высококачественного дистиллята, возвращаемого в производство, и высококонцентрированных растворов или шламов, направляемых на утилизацию либо хранение.

Многолетняя эксплуатация выпарных установок доказала их высокую надежность, экологическую безопасность и экономическую эффективность. Однако применяющиеся выпарные аппараты с естественной или принудительной циркуляцией морально устарели и не могут быть рекомендованы для создания новых или реконструкции ранее изготовленных установок [4].

Наиболее эффективным направлением в переработке химически загрязненных стоков и снижении техногенной нагрузки на природные водоемы в настоящее время является создание локальных замкнутых систем водопотребления на основе гибких технологических приборов и аппаратов (ГТПА).

В сравнении с широко применяемыми выпарными аппаратами с естественной или принудительной циркуляцией, ГТПА обладают рядом существенных преимуществ: вследствие более высокого коэффициента теплопередачи в 1,6—3 раза уменьшается теплопередающая поверхность, а следовательно, металлоемкость и стоимость аппарата; в 1,5—2 раза снижаются удельные энергозатраты, что объясняется возможностью более эффективного использования полезной разности температур; аппараты в значительно меньшей степени склонны к образованию накипи на теплообменных поверхностях и вспениванию перерабатываемых растворов; они компактны и легко вписываются в существующие производственные помещения; возможно изготовление экономически эффективных аппаратов малой и средней производительности; аппараты просты в изготовлении и надежны в эксплуатации; их малая инерционность обусловлена незначительным объемом находящейся в них жидкости, что значительно облегчает автоматическое регулирование и управление технологическим процессом, многократно сокращает время запуска установки; они могут эффективно эксплуатироваться как в непрерывном, так и в периодическом режимах и обеспечивают возможность последовательной переработки различных растворов.

Принципиально важной является возможность использования ГТПА малой и средней производительности для создания локальных установок для упарки отработанных технологических растворов (стоков) по месту их образования. Указанная технология является удачным примером локальной замкнутой системы водопотребления, которая, в отличие от общезаводских замкнутых систем, позволяет эффективно использовать даже те компоненты, которые обычно в виде токсичных твердых отходов загрязняют окружающую среду.

С целью возврата кислот в технологический процесс травления разработаны технологии, позволяющие регенерировать отработанные сернокислотные (солянокислотные) и азотно-плавиковые травильные растворы и утилизировать получаемый в результате регенерации оксид железа. Степень регенерации азотной кислоты достигает 99,5%, плавиковой — 99,9%, серной — 99,6%. При этом в процессе термического гидролиза (пирогидролиз) смеси отработанных травильных растворов высвобождаются не только свободные, но и связанные (из солей) кислоты; процесс регенерации протекает в направлении, обратном процессу травления металла.

При определенной концентрации ионов водорода и температуре обработки оптимизируются скорости разложения солей, отгонки паров и их конденсации с получением исходных растворов кислот. Это позволяет осуществлять непрерывный процесс регенерации кислот и практически полностью возвращать кислоты (азотную, серную, плавиковую), затраченные на травление металлических изделий, в травильные линии, а также утилизировать другие продукты регенерации (оксиды металлов). Так, уже отработан процесс травления печатных плат, который свободен от проблем, связанных с образованием большого количества отходов и возникновением в процессе травления опасных и сложных, с точки зрения утилизации, соединений. Здесь травящий раствор регенерируется практически бесконечно — один раствор может работать в травильной машине до трех лет (см.рис. 1 [5]).

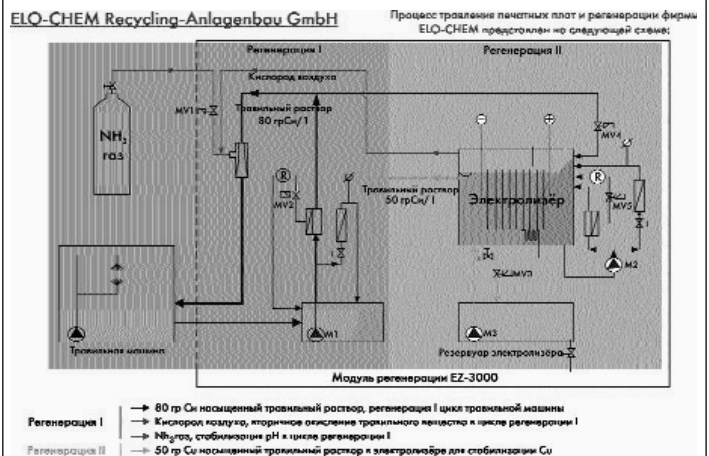


Рис. 1. Схема установки технологического процесса травления ПП

Процесс регенерации травящего раствора реализуется на установке EZ-3000. Он включает два этапа: на первом этапе происходит постоянное восстановление травильного раствора (регенерация I), на втором этапе происходит электролитическое восстановление меди из отработанного травильного раствора (регенерация II).

На этапе «регенерация I» происходит химический процесс восстановления двухвалентного тетрааминового комплекса меди до одновалентного. Металлическая медь окисляется и растворяется в щелочном растворе. Одновалентные ионы меди благодаря подаче кислорода проходят процесс повторного окисления до двухвалентных ионов меди, что позволяет использовать относительно небольшое количество травильного раствора в замкнутом цикле.

Необходимый для процесса окисления кислород нагнетается в травильную установку двумя насосами через электролизер, в котором он увлекает за собой образовавшиеся во время электролиза газы — кислород и аммиак. При этом применяется специальный травильный раствор CTS-Recycling-Etch, который принципиально соответствует известным травильным веществам на основе аммиака, однако используемый обычно хлорид меди заменен здесь на сульфат меди. Хотя это и влечет за собой уменьшение скорости травления, но дает возможность осуществления прямого электролиза травильного вещества, во время которо-

го не выделяется газообразный хлор; потеря скорости компенсируется присадкой ELO-Fast 40.

На этапе «регенерация II» в установке EZ-3000 часть травильного раствора, содержащего одновалентные ионы меди, направляется в модуль электролиза, где медь осаждается на катоде и снижает процентное содержание в нем меди. Осажденная на катоде металлическая медь извлекается листами, выделившиеся на аноде газы (кислород и аммиак) возвращаются в травильный раствор для поддержания процесса окисления меди.

Оба этапа пространственно разделены и протекают независимо друг от друга, хотя процессы травления и регенерации меди логически связаны между собой.

Совместное протекание регенерации I и II координируется двумя измерителями плотности травильных растворов и регулятором плотности тока в электролизере. Одно устройство измерения контролирует текущее значение плотности травильного раствора на этапе регенерации I и при достижении заданного значения автоматически включает регенерацию II (электролиз).

Второе устройство измерения плотности раствора контролирует концентрацию меди в травильном растворе в электролизере. Концентрация меди во время электролиза снижается, при снижении плотности раствора ниже заданного открывается магнитный клапан, через который травильный раствор из травильной машины поступает в электролизер. Вследствие этого концентрация меди в электролизере снова становится выше заданного значения, уровень травильного раствора в электролизере повышается, а избыток восстановленного травильного раствора переливается из электролизера в травильную камеру, где содержание меди в травильном растворе снижается.

Параллельный процесс контроля плотности растворов, концентрации меди в камере травления и в электролизере обеспечивает в масштабе реального времени ликвидацию повышенной концентрации меди в травильной камере.

Установка регенерации меди EZ-3000 состоит из модуля регенерации травильного раствора, насоса, двух устройств контроля плотности растворов, устройства контроля значения уровня pH и фильтрации, системы подачи охлаждающей воды с регулированием ее температуры, системы контроля уровня жидкости, системы измерения плотности тока электролизера, системы вытяжки газов и устройства обогрева во время пауз в работе. Установка визуализирует информацию о температуре травильного раствора в электролизере, о значении уровня pH и плотности тока электролиза, о состоянии технологического процесса, а также диагностическую информацию. Мощность модуля регенерации EZ-3000 составляет 2—5 кг меди в час.

За счет жестко поддерживаемых параметров травления система с травильным раствором на основе сульфата меди заменяет широко распространенные щелочные и кислотные растворы травления на основе хлорида меди и позволяет одновременно травить платы, изготавливаемые как по позитивному, так и по негативному методам. Травильная установка и модули регенерации могут быть разнесены в пространстве, их компоновка не критична.

Главным преимуществом электролиза является возможность получения на катоде свободного металла, при этом не происходит вторичного загрязнения стока.

В зависимости от требований к гальванопокрытию плотность тока в гальванической ванне варьируется. Но при постоянстве требований к качеству покрытия и варьировании площади гальванопокрытия, при неизбежном обеднении (во времени) содержимого ванны осаждаемым металлом приходится заботиться о регулировании, в реальном масштабе времени, плотности тока.

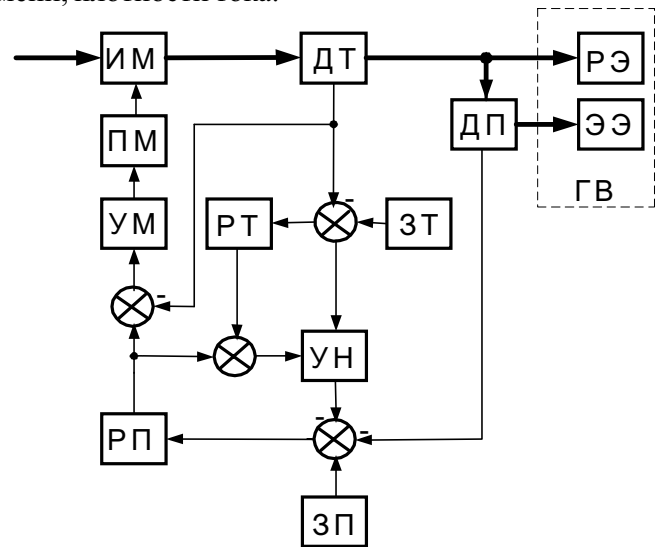


Рис. 2. Функциональная схема системы автоматического регулирования плотности тока в гальванической ванне

Автоматическое регулирование плотности тока может быть достигнуто системой, содержащей (рис. 2) исполнительный механизм (ИМ), датчик потребляемого тока (ДТ), рабочий электрод (РЭ) — объект, подвергающийся гальванической обработке, задатчик допустимого тока потребления (ЗТ), регулятор ограничения тока (РТ), регулятор плотности тока (РП), усилитель напряжения (УН), усилитель мощности (УМ), привод исполнительного механизма (ПМ), датчик плотности тока (ДП), эталонный элемент (ЭЭ) и четыре сумматора [6].

Эталонный электрод, имея единичную площадь поверхности контакта с электролитом в гальванической ванне (ГВ), позволяет на выходе датчика плотности тока однозначно оценить ее значение. По результатам сравнения с задатчиком плотности тока (ЗТ) через РП и ПМ поддерживается состояние ИМ на уровне, обеспечивающем заданное значение плотности тока и качество гальванопокрытия при максимизации использования (извлечения) цветных металлов и минимизации энергозатрат.

Использование автоматического регулирования плотности тока в гальванической ванне позволяет, кроме обеспечения заданного качества гальванопокрытия, значительно сократить расход металла и, что немаловажно, содержание металла в стоках.

Несомненным успехом в альтернативном протистоянии ПП было предложение, выдвинутое в 1968 году Марлеем и Тролсеном, о применении полиимидной пленки для создания на ее основе

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА

гибридных гибких интегральных схем (ГГИС) и соединительных шлейфов. Однако перенос из технологии ПП принципа сквозных отверстий создал ряд технических проблем, ставших причиной очень большой трудоемкости изготовления.

Вместе с тем предложение позволяет исключить из конструкции ПП сквозные отверстия в них, а из технологического цикла, соответственно, исключить химические процессы — травление меди, металлизацию палладием и медью сквозных отверстий, химические процессы травления отверстий в гибкой полиимидной пленке. Все это открывает возможность создания экологически чистого производства ПП и ГГИС без необходимости возведения очистных сооружений.

По предлагаемой технологии изготовления изделий электронной аппаратуры (проект) вместо фольгированного материала рекомендуется использовать любую полимерную пленку, металлизированную в

вакууме тонким (2—3 мкм) слоем меди, что неограниченно расширяет номенклатуру используемых материалов, т. к. ни один полимер, кроме полиимида, практически не поддается химическому травлению (как, например, полиэтиленовая и фторопластовая пленки). Полученная двухсторонняя гибкая схема припрессовывается на любое жесткое основание — пластмассу, картон, композиционный материал, металл. Высокая плотность проводников в слое достигается за счет отсутствия получаемых травлением переходных отверстий с их контактными площадками и за счет процесса осаждения меди реверсированным током из специального электролита, обеспечивающего минимальное боковое разрастание элементов (20—40%).

Конструктивно-технологические показатели процесса и самих печатных плат представлены **в таблице**.

Следует особо отметить преимущество одностороннего расположения электрорадиоэлементов (ЭРЭ) в новой конструкции плат, что делает удобным их

Характеристики	Стандартные ПП	Гибкие ПП на фольгированном полиимиде	ПП по проекту
Пример материала ПП	Стеклотекстолит, толщина 1—2 мм	Полиимид фольгированный, толщина 40 мкм	Фторопластовая пленка, толщина 20 мкм
Возможность выбора материала	Ограничена фольгированным стеклотекстолитом	Ограничена фольгированным с одной стороны полиимидом	Нет ограничений, возможно применение любого полимерного материала
Особенности технологического процесса	Сверление отверстий, их химическая металлизация. Химическое травление толстого слоя меди с поверхности (до 800 г меди с 1 м ²)	Химическое травление полимерной пленки в местах отверстий. Химическое травление меди с поверхности (до 350 г меди с 1 м ²)	Травлению подвергается только тончайшая пленка меди, нанесенная в вакууме (до 6 г меди с 1 м ²)
Экологичность производства	Большой расход органических и неорганических веществ, требуется утилизация отходов — кислот, солей (до 1000 г/м ²). Обязательно наличие очистных сооружений	Большой расход химических веществ — органических травителей, кислот, солей и т. п. (300—400 г/м ²). Обязательно наличие очистных сооружений	Не требуются очистные сооружения. Достаточно цеховой установки сухой утилизации отходов
Минимальная ширина проводников и зазоров, мкм	150	100	50
Минимальный диаметр переходного отверстия, мкм	300	100	20 (электропереход)
Минимальный размер контактной площадки под переходное отверстие, мкм	600×600	500×500	100×100
Потери поверхности из-за использования сквозных отверстий, %	до 30	до 30	—
Величина бокового разрастания проводника, %	>100	>100	20—30
Плотность проводников в слое, мм ⁻¹	2—3	3—4	6—8
Тепловое сопротивление системы "кристалл—плата—окружающая среда": в естественных условиях, °С/Вт	10—20	Нет данных	0,5—1,2 (металл—подложка)
с принудительным воздушным охлаждением, °С/Вт	6—12	Нет данных	0,1—0,4 (металл—подложка)

групповой монтаж, а также облегчает прозвонку цепей (известно, в какую долю цены обходится электрическая проверка многослойных плат с двухсторонним расположением ЭРЭ). В то же время обратная сторона основания может быть использована для расположения другой гибкой платы, что особенно важно в случае их электрической связи (функционального взаимодействия). В этом варианте не требуется объединительной платы для их коммутации через дополнительные разъемы (соединить можно одним или несколькими шлейфами).

Двухсторонняя гибкая плата является базовым элементом построения многослойной структуры. Вертикальная электрическая связь между отдельными платами осуществляется в процессе монолитизации пакета при его прессовании к основанию. Учитывая высокую плотность проводников в каждом электрическом уровне, число слоев готовой многослойной печатной платы (МПП) значительно сокращается по сравнению с типовой МПП.

Сравнительный анализ технологических операций производства ПП по проекту и стандартной технологии показывает, что значительная часть оборудования, применяемого для изготовления ПП традиционным способом, может быть использована по прямому назначению при переходе на новую технологию. Это относится к оборудованию для двухстороннего экспонирования, нанесения слоя защиты, прессования, к гальваническим установкам, сверлильному оборудованию. Поэтому для участков (цехов), оснащенных современным прогрессивным оборудованием, при переходе на новую технологию больших капитальных затрат не предвидится.

Следует отметить, что производство ПП 5-го и выше класса точности потребует для фотолитографических (жидкостных) операций наличия «чистых» комнат, как это имеет место в микроэлектронике.

В сбрасываемых водотоках содержится огромное количество дефицитных металлов в виде оксидов, гидроксидов, солей и других соединений. Применяемые на большинстве предприятий реагентные сооружения не удовлетворяют современным требованиям к очистке стоков и не обеспечивают их утилизацию. В результате на химические свалки попадают обезвреженные и нейтрализованные отходы отвалы с содержанием ценных металлокомпонентов.

Наиболее эффективным подходом к решению данной проблемы является внедрение локальных малоотходных технологий, предусматривающих поэтапное извлечение ценных соединений, их возврат в технологический цикл, вторичное использование очищенной промывной воды, а также получение товарных форм утилизируемых соединений [5].

Процесс комплексной переработки медьсодержащих стоков травления печатных плат с целью получения хлорокиси меди (ХОМ) и хлорида аммония реализует достаточно эффективную технологическую схему, обеспечивающую экологическую безопасность производства на всех стадиях процесса, исключая образование токсичных отходов, газовых выбросов и загрязнение сточных вод ионами тяжелых металлов. Он предписывает: использование сис-

темы оборотного водоснабжения и возвращения массопотоков в технологический цикл; непрерывность процесса с получением товарных продуктов утилизации, соответствующих по качеству их промышленным аналогам (для ХОМ — ГОСТ 13200–75, для хлорида аммония — ГОСТ 2210–73); возможность утилизировать как щелочные, так и кислые травильные стоки с извлечением до 96—98% меди и до 97% хлорида аммония; высокую производительность процесса, в котором при переработке 5 м³ отходов получается 1000 кг ХОМ и 1300 кг хлорида аммония.

Реализация данной технологии осуществляется на блочно-модульном комплексе, представляющем собой замкнутую технологическую систему из двух локальных установок для утилизации меди из травильных стоков и хлорида аммония из солевых потоков от производства ХОМ. В основе осаждения хлорокиси меди лежит реакция взаимодействия медно-аммиачного комплекса травителя и технической соляной кислоты. Процесс включает следующие технологические стадии: синтез и осаждение суспензии ХОМ; отмывку реакционной массы от свободного хлорида аммония; фильтрацию осадка; сушку; приготовление товарной формы. Хлорокись меди может быть получена в виде двух препаративных форм: 90%-ного смачивающегося порошка (с. п.) и 30%-ного суспензионного концентрата (с. к.) — пасты.

Для приготовления пастообразной модификации в технологии утилизации предусмотрена дополнительная стадия измельчения и смешивания влажного отфильтрованного осадка ХОМ с целевыми добавками до получения однородной массы. Отработка и оптимизация процесса утилизации с отбором проб для исследования проводились на стендовой экспериментальной установке, смоделированной как лабораторный вариант технологической линии для опытно-промышленного получения ХОМ. При этом установлены, а затем и адаптированы к производственным условиям переработки стоков концентрационные соотношения и режимы процесса, а именно:

- 1) использование в качестве сырья отработанных растворов медно-аммиачного травления печатных плат с содержанием меди по комплексу 120 ± 20 г/л;
- 2) применение в качестве нейтрализующего реагента раствора технической соляной кислоты с оптимальной концентрацией, обеспечивающей: максимальную скорость и полноту осаждения меди; достижение рабочего значения рН реакционной массы; образование легко растворимого побочного продукта — хлорида аммония, удаляемого из осадка при промывках до нормативной концентрации; образование осадка определенного гранулометрического состава, влияющего на полноту осаждения меди, формирование хлорокисного соединения и скорость фильтрации; создание теплового режима реакции нейтрализации, исключая нагрев раствора выше 40—60°С;
- 3) создание оптимальной кислотности реакционной массы, т. к. повышение рН приводит к растворению ХОМ и появлению в пульпе свободного хлорида аммония; при снижении рН в растворе присутствуют непрореагировавшая медь и несвязанная соляная кислота;
- 4) применение двукратной промывки осадка ХОМ в реакторе объемом воды, вдвое превышающим объем

промываемой массы, с целью удаления из нее водорастворимых хлоридов;

5) использование вакуумной фильтрации и подбор оптимальным путем оптимальной толщины слоя осадка на фильтре (единовременная загрузка большой массы ХОМ приводит к снижению скорости фильтрации и увеличению времени проведения данной операции);

6) применение технологического оборудования, обеспечивающего безопасность производства и качественное проведение всех стадий утилизации в соответствии с разработанной научно-технической документацией на процесс.

Опыт использования подобных технологий показывает, что реагентные методы в сочетании с гравитационным отделением загрязнений не позволяют достичь высокой степени очистки и организовать водооборот.

Более перспективно использование электрохимических, ионообменных и мембранных технологий, многие из которых разрабатываются и внедряются в мировой практике. Чаще всего в производственной практике для удаления ионов тяжелых металлов, в частности, меди, используют реагентный метод, заключающийся в осаждении металлических ионов при добавлении к стоку соответствующего реагента. Его достоинство — простота, а недостатки — в сток вводится новое химическое вещество, т. е. новое загрязнение, кроме того, полученные обводненные осадки имеют большой объем.

С целью создания безотходного производства хлорокси меди с бессточной системой водообеспечения разработана схема рационального использования образующихся при утилизации водопотоков. Данная схема предусматривает: возврат части потоков в технологический цикл на стадию промывки суспензии ХОМ в реакторе и на фильтре; применение массопотоков с содержанием хлорида аммония до 17% для приготовления и корректировки травильных растворов меди с рабочей концентрацией аммиачной соли 4—10%; утилизацию из сточных потоков товарного продукта — кристаллического хлорида аммония по разработанной технологии.

Метод извлечения хлорида аммония из водно-солевых масс производства ХОМ включает стадии: упаривание и отгонку воды (дистиллята); кристаллизацию упаренной пульпы; вакуумную фильтрацию осадка; сушку готового продукта.

Ведение процесса по описанной технологии не влечет за собой образования сточных вод, твердых отходов и газовыделений. Процесс осуществляется при постоянном аналитическом контроле сырья, реакционной массы и конечного продукта. Утилизированный хлорид аммония является аналогом технического химката, выпускаемого по ГОСТ 2210–73; товарная форма может содержать 0,2—2,0% остаточной меди.

Таким образом, в основе комплексной утилизации травильных стоков лежит объединенная технологическая схема извлечения меди в виде ее хлорокси и дополнительного продукта — хлорида аммония.

В процессе адаптации технологии к производственным условиям эксплуатации установлены: материальный баланс используемого сырья, реагентов процесса и полупродуктов для получения 1 т ХОМ и 1 т хло-

рида аммония; блок-схемы безотходной реализации массопотоков указанных производств; аналитический и метрологический контроль производств и управления процессом утилизации; основные правила безопасной эксплуатации технологического оборудования и др.

Хлорокись меди, утилизируемая из травильных стоков, в виде двух товарных форм (90%-ный с. п. и 30%-ный с. к.) является высокоэффективным фунгицидом, широко применяемым в сельском хозяйстве для подавления болезней плодово-овощных и ягодных культур. Оба препарата ХОМ пожаро- и взрывобезопасны.

Биологическая активность товарных форм ХОМ, утилизированных из травильных стоков, изучена специалистами НИИ химических средств защиты растений в полевых условиях на ряде распространенных культур (картофеле, томатах, луке, огурцах, хмеле и др.) сравнительно с эталоном — фунгицидом производства ПО “Химпром”. Было установлено: товарные формы ХОМ, полученные из медьсодержащих травильных стоков, не уступают по своим свойствам эталону и могут использоваться в сельском хозяйстве; фунгицид на основе ХОМ из травильных растворов не оказывает токсического воздействия на сельхозпродукты; исследуемые формы ХОМ обладают высокой биологической активностью, что наиболее выражено при трехкратной обработке культур с нормой расхода фунгицида по действующему веществу 1,6—2,0 кг/га.

Данная технология создает предпосылки для организации производства фунгицида, потребность в котором для сельского хозяйства СНГ составляет свыше 1000 т/год. Для сравнения: получение ХОМ промышленным способом требует применения дефицитного сырья (медный лом, хлор электролитический, технический мел) и проведения экологически неблагоприятных стадий (переплавка меди, ее чешуирование, хлорирование раствора и т. п.). Производство хлорида аммония также связано с такими дорогостоящими реагентами как аммиак и соляная кислота.

Использование вышеописанных технологий гальванического производства позволяет осуществлять и травление, и гальванопокрытие поверхностей при оптимальном расходе энергии и материалов, а также при возврате технологических сред в производство, что в совокупности обеспечивает ресурсосбережение при защите среды обитания человека от опасного ее загрязнения.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Черняев В. Н. Физико-химические процессы в технологии РЭА.— М.: Высшая школа, 1987.
2. Грилихес С. Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов.— Л.: Машиностроение, 1977.
3. Лурье Ю. Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод.— М.: Химия, 1984.
4. Гарбер М. И. Ресурсосберегающая технология гальванических покрытий.— М.: Машиностроение, 1988.
5. Зайцев А. Н. Технологические преимущества электрохимической обработки // Технология, оборудование, материалы.— 2003.— № 4.— <http://www.mte.ru>.
6. Пат. 1783470 SU. Система автоматического регулирования плотности тока в гальванической ванне / М. Д. Скубилин, И. М. Скубилин.— 1992.

Д. т. н. А. В. ДРОЗД, д. т. н. Н. Б. КОПЫТЧУК,
Е. В. ОГИНСКАЯ

Украина, Одесский нац. политехнический университет
E-mail: drozd@ukr.net

Дата поступления в редакцию
06.02 2004 г.

Оппонент к. т. н. М. В. ЛОБАЧЕВ
(ОНУ им. И. И. Мечникова, г. Одесса)

МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ С ПЛАВАЮЩЕЙ ТОЧКОЙ

Метод обнаруживает ошибки в зависимости от их величины и повышает достоверность контроля результатов, снижая отбраковку достоверных результатов.

Основным методом оперативного тестирования вычислительных устройств является контроль по модулю [1], который наиболее часто используется для проверки умножения чисел, как и других арифметических операций. Популярность контроля по модулю объясняется двумя причинами.

Во-первых, наибольшее распространение в вычислительной технике получили полные арифметические операции. Во-вторых, контроль по модулю является эффективным методом проверки правильности выполнения полных арифметических операций в современных матричных устройствах [2, 3]. При малой относительной сложности средств контроля метод обеспечивает обнаружение всех наиболее вероятных ошибок на выходах матричных устройств.

Однако полные операции являются необходимыми лишь при обработке точных данных, к которым относятся только числа, являющиеся целыми по своей природе, — номера элементов множеств. Остальные числа, составляющие основную часть данных, — результаты измерения и результаты их обработки — относятся к приближенным данным.

Использование полных операций для обработки приближенных данных в современных устройствах нерационально. Форматы с плавающей точкой, наиболее часто представляющие приближенные данные, поддерживают, согласно теории ошибок [4], единую разрядность для мантисс операндов и результатов [5]. А поскольку результат двухместной полной операции имеет удвоенную разрядность, то младшая половина вычисленного результата отбрасывается.

Контроль по модулю обнаруживает ошибки в полном произведении. При равномерном распределении ошибок по разрядам полного произведения каждая вторая ошибка возникает и будет обнаружена в отбрасываемой части произведения. Несущественные ошибки возникают также в расширенных форматах данных, а также при выравнивании порядков. Такие ошибки не снижают количества верных разрядов результата и поэтому являются несущественными для его достоверности.

Обобщенный контроль по модулю, разработанный для сокращенных операций, обнаруживает несущественные ошибки в меньшем количестве отбрасываемых разрядов по сравнению с полной операцией [6, 7]. Однако сохраняется другой недостаток целочисленных методов контроля — не различаются ошибки по их величине. Это приводит к обнаружению несущественных ошибок, величина которых меньше уровня погрешности вычислений.

Обнаружение несущественных ошибок ведет к отбраковке достоверных результатов, что снижает достоверность контроля результатов приближенных вычислений и является существенным недостатком метода контроля по модулю. Для преодоления этого недостатка необходимо разрабатывать методы, различающие существенные и несущественные ошибки. К таким методам относится контроль по неравенствам, известный для одноместных операций [8].

Постановка задачи

Контроль по неравенствам обеспечивает проверку результата его сравнением с верхней и нижней границами, посчитанными по операндам.

Операция умножения выполняется над двоичными n -разрядными нормализованными мантиссами A и B , которые находятся в пределах $2^{-1} \leq A < 1$, $2^{-1} \leq B < 1$ и формируют мантиссу V произведения той же разрядности.

Ставится задача разработки метода контроля по неравенствам для повышения достоверности контроля результатов приближенных вычислений путем снижения отбраковки достоверных результатов в умножителе мантисс чисел.

Для решения задачи следует использовать способность метода оценивать величину ошибки, что позволяет различать существенные и несущественные ошибки, обнаруживая их с различной вероятностью.

Определение контрольных неравенств

Верхняя граница V_H результата $V=AB$ определяется по границам операндов — мантисс A и B . Из неравенств $A < 1$ и $B \geq 2^{-1}$ следует формула

$$\Delta_H \geq 0, \quad (1)$$

где $\Delta_H = (1-A)(B-0,5)$.

После раскрытия скобок и учета равенства $AB=V$ формула (1) преобразуется к виду

$$0,5A+B-0,5 \geq V.$$

Полученное неравенство, рассмотренное непосредственно для $A \geq B$, а после перемены мест сомножи-

телей — также для случая $B \geq A$, определяет следующую верхнюю границу результата:

$$V_H = C_H V_{H1} + \neg C_H V_{H2}, \quad (2)$$

где $C_H = (A \geq B)$ — результат сравнения мантисс A и B , а V_{H1} и V_{H2} — значения нижней границы:

$$V_{H1} = 0,5A + B - 0,5 \text{ для } A \geq B; \quad (3)$$

$$V_{H1} = 0,5B + A - 0,5 \text{ для } B > A. \quad (4)$$

Для $A \geq B$ из формулы (3) следует:

$$\Delta_H = V_H - V. \quad (5)$$

Нижняя граница определяется по верхней границе как

$$V_L = V_H - \Delta_{HL}, \quad (6)$$

где $\Delta_{HL} \geq \Delta_H$.

Для случая (3) формула (6) с учетом (5) приводится к виду

$$V_L = V - \Delta_L,$$

где $\Delta_L = \Delta_{HL} - \Delta_H$.

Величина Δ_{HL} определяется аналогично Δ_H по формуле

$$\Delta_{HL} = (1 - A^*)(B^* - 2^{-1}). \quad (7)$$

Для выполнения неравенства $\Delta_L \geq \Delta_H$ принимается $1 - A^* \geq 1 - A$ и $B^* - 2^{-1} > B - 2^{-1}$, из чего следует: $A \geq A^*$ и $B^* > B$. Эти неравенства обеспечиваются при получении A^* и B^* соответственно из мантисс A и B ограничением их разрядности от исходного значения n до m бит ($m < n$), а также увеличением ограниченного значения B на единицу младшего разряда.

Тогда значения A^* и B^* описываются как

$$A^* = \text{Int}(2^m A) / 2^m;$$

$$B^* = (\text{Int}(2^m B) + 1) / 2^m,$$

где $\text{Int}(x)$ — целая часть числа x .

Величина $\Delta_L = \Delta A(B - 0,5) + \Delta B(1 - A) + \Delta A \Delta B$, где $\Delta A = A - A^*$ и $\Delta B = B^* - B$, а при подстановке усредненных значений $\Delta A = \Delta B = 2^{-m-1}$, пренебрегая произведением $\Delta A \Delta B$, получим:

$$\Delta L = (B - A + 0,5) 2^{-m-1}. \quad (8)$$

Контроль результата выполняется поочередным сравнением результата с его верхней и нижней границами, для чего вычисляется текущая граница

$$V_{HL} = C_{HL} V_H + \neg C_{HL} V_{H2},$$

где C_{HL} — параметр, управляющий очередностью сравнения результата с его верхней и нижней границами, $V_{HL} = V_H$ при $C_{HL} = 1$ и $V_{HL} = V_L$ при $C_{HL} = 0$.

Обнаруживающая способность метода

Обнаруживающая способность метода оценивается вероятностями обнаружения ошибок, увеличивающих и уменьшающих результат умножения.

Ошибка E_H , увеличивающая результат, не обнаруживается при попадании в интервал Δ_H (т. е. при условии $E_H < \Delta_H$), из которого определяется диапазон значений мантиссы B

$$0,5 + E_H / (1 - A) < B \leq A$$

и объем диапазона

$$\delta B = A - 0,5 - E_H / (1 - A),$$

а с учетом $\delta B > 0$, т. е., решая квадратное неравенство

$$A^2 - 1,5A + 0,5 + E_H < 0, \quad (9)$$

также диапазон значений мантиссы A

$$A_1 < A < A_2,$$

где $A_1 = 0,75 - D_H / 2$ и $A_2 = 0,75 + D_H / 2$ — корни неравенства (9),

$$D_H = \sqrt{0,25 - 4E_H}; \quad E_H \leq 2^{-4}.$$

Количество входных слов, на которых не обнаруживается ошибка E_H для случаев (3) и (4), составит

$$W_{DH} = 2 \int_{A_1}^{A_2} \delta B \, dA = 2 \int_{A_1}^{A_2} (A - 0,5 - E_H / (1 - A)) \, dA.$$

Общее количество входных слов оценивается произведением объемов диапазонов сомножителей и составляет $W = 0,25$.

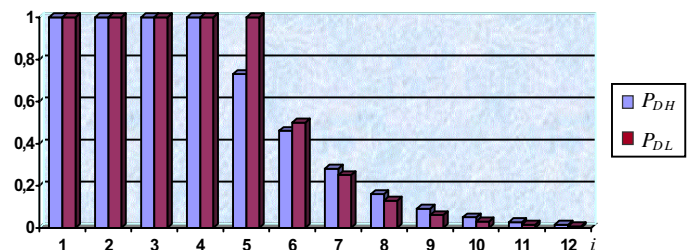
Тогда вероятность обнаружения ошибки E_H определяется по формуле

$$P_{DH} = 1 - W_{DH} / W = 1 - 2D_H - 8E_H(\ln(1 - A_2) - \ln(1 - A_1)).$$

Для ошибки E_L , уменьшающей результат, из условия $E_L < \Delta_L$ и (8) определяется объем диапазона $\delta B = 0,5 - E_L 2^{m+1}$ значений мантиссы B для всех значений мантиссы A и вероятность обнаружения ошибки

$$P_{DL} = 1 - 4 \int_{0,5}^1 (0,5 - E_L 2^{m+1}) \, dA = 2^{m+2} E_L, \quad E_H \leq 2^{-m-2}.$$

Зависимости вероятностей P_{DH} и P_{DL} (для $m=3$) от величины ошибки иллюстрируют временные диаграммы, по оси абсцисс которых отложены номера i разрядов мантиссы результата, веса 2^{-i} которых совпадают с величиной ошибки (см. рисунок).



Временные диаграммы зависимости вероятностей P_{DH} и P_{DL} от величины ошибки

Вероятность обнаружения ошибки увеличивается с ростом ее величины.

Достоверность контроля результатов

Достоверность контроля результатов оценивается по ее дополнению до единицы — показателю недостоверности [9]:

$$D_N(t) = (P_{пр} + P_{отб})(1 - P_{пф}(t)), \quad (10)$$

где $P_{пр}$ — вероятность пропуска существенной ошибки;

$P_{отб}$ — вероятность отбраковки достоверного результата;

$P_{пф}(t)$ — вероятность правильной работы вычислительного устройства за период времени t .

Вероятности $P_{пр}$ и $P_{отб}$ определяются по формулам [10]

$$P_{пр} = K_t (1 - P_{DE}); \quad (11)$$

$$P_{отб} = (1 - K_t) P_{DN}, \quad (12)$$

где K_T — вероятность появления существенной ошибки;
 P_{DE} , P_{DN} — вероятность обнаружения существенной и несущественной ошибок, соответственно.

Пусть результат имеет 8 верных разрядов, в которых проявляются существенные ошибки. Тогда из диаграмм (см. рис.) по значениям P_{DH} , P_{DL} соответственно первых восьми и следующих за ними разрядов вычисляются усредненные значения вероятностей $P_{DE}=0,7$ и $P_{DN}=0,07$. Согласно (10)—(12), $P_{пр}=0,3$, K_T и $P_{отб}=0,07-0,07K_T$, а показатель недостоверности $D_N(t)=(0,07+0,23K_T)(1-P_{пф}(t))$.

Для значений вероятности $K_T=0,1$ и $K_T=0,2$ показатель недостоверности $D_N(t)=0,09(1-P_{пф}(t))$ и $D_N(t)=0,12(1-P_{пф}(t))$.

Контроль по модулю, обнаруживающий присутствие матричным устройствам ошибки с одинаково высокой вероятностью $P_D=P_{DE}=P_{DN}=1$, имеет показатели $P_{пр}=0$, $P_{отб}=1-K_T$ и $D_N(t)=(1-K_T)(1-P_{пф}(t))$, что для $K_T=0,1$ и $K_T=0,2$ определяет значения $D_N(t)=0,9(1-P_{пф}(t))$ и $D_N(t)=0,8(1-P_{пф}(t))$, превышающие показатель недостоверности предложенного метода соответственно в 10 и 6,7 раз.

Заключение

Предложенный метод контроля по неравенствам множителя мантисс обеспечивает оценку величины ошибок, выполняя их обнаружение с вероятностью, зависящей от величины ошибок. Это позволяет различать ошибки, существенные и несущественные для достоверности результатов приближенных вычислений, и повышать достоверность контроля результатов.

По сравнению с основным методом оперативного тестирования — контролем по модулю — предложенный метод многократно снижает показатель недостоверности за счет уменьшения вероятности отбраковки достоверных результатов. Степень снижения показателя недостоверности повышается с уменьшением вероятности появления существенной ошибки.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Согомонян Е. С., Слабаков Е. В. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. — М.: Радио и связь, 1989.
2. Журавлев Ю. П., Котелюк Л. А., Циклинский Н. И. Надежность и контроль ЭВМ. — М.: Сов. радио, 1978.
3. Jenkins W. The design of error checkers for self-checking residue number arithmetic // EEE Trans. on Computers. — 1983. — Vol. C-32. — P. 388—396.
4. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. — М.-Л.: ОГИЗ, 1948.
5. IEEE Standard for Binary Floating-Point Arithmetic. — ANSI / IEEE Std 754—1985, IEEE. — New York, USA.
6. Drozd A. V., Lobachev M. V., Hassonah W. Hardware check of arithmetic devices with abridged execution of operations // Proc. The European Design & Test Conf. — Paris, France. — 1996. — P. 611.
7. Дрозд О. В. Контроль за модулем обчислювальних пристроїв. — Одеса: АО Бахва, 2002.
8. Дрозд А. В. Контроль вычислительных устройств по неравенствам // Уч. зап. Симфероп. гос. ун-та. — Спец. вып. — Винница — Симферополь, 1998. — С. 237—240.
9. Дрозд А. В. Достоверность рабочего диагностирования вычислительных устройств для обработки приближенных данных // Зб. наук. праць Харківськ. військового ун-ту НАНУ. Системи обробки інформації. — 2002. — Вип. 4. — С. 8—13.
10. Drozd A. On-line testing of computing circuits at approximate data processing // Радіоелектроніка та інформатика. — 2003. — № 3. — С. 113—116.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Тихонов В. И., Харисов В. Н. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И СИНТЕЗ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ.— М.: Радио и связь, 2003.— 608 с.

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

Для студентов радиотехнических специальностей вузов и специалистов.

НОВЫЕ КНИГИ



Фомина Н. Н. (под ред.). РАДИОПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА.— М.: Радио и связь, 2003.— 604 с.— 2-е изд., испр. и доп.

Изложены принципы построения, основные схмотехнические и системотехнические решения и теоретические основы работы приемно-усилительных устройств. Рассмотрены состояние и пути развития радиоприемных устройств с использованием современной элементной базы, цифровой и микроволновой техники.

Для студентов вузов и факультетов связи.

Д. ф.-м. н. И. М. ВИКУЛИН, к. ф.-м. н. В. И. ИРХА,
к. ф.-м. н. Б. В. КОРОБИЦЫН, к. т. н. В. Э. ГОРБАЧЕВ

Украина, Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова
E-mail: phys@onat.edu.ua

Дата поступления в редакцию
16.12 2003 г.

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

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕГРАДАЦИИ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

Предложен метод тестирования фосфид-галлиевых светоизлучающих диодов на величину срока службы, значительно сокращающий время отбраковки ненадежных СИД в производстве.

Оценка надежности полупроводниковых приборов базируется на всестороннем исследовании закономерностей развития и механизмов деградации, приводящих к отказам того или иного типа.

Деградацию полупроводниковых приборов изучают под разными углами зрения. Выяснение причин деградации направлено на последующее влияние на них так, чтобы уменьшить скорость и величину деградации. Выяснение закономерностей деградации направлено на выявление ранних признаков (предвестников) быстрой и сильной деградации в ходе дальнейшей работы прибора. Мы здесь обсудим второй аспект проблемы.

Деградация светоизлучающих диодов (СИД) проявляется чаще всего в уменьшении внешней эффективности излучения света.

В условиях сохранения автоматичности механизмов деградации целесообразно производить испытания при повышенных температурах, т. к. деградация в нормальных условиях происходит слишком медленно. Температурная зависимость скорости деградации описывается определенной энергией активации. Так, в частности, в работе [1] для фосфид-галлиевых светоизлучающих диодов энергия активации определена как 0,5—0,8 эВ.

Скорость деградации увеличивается с увеличением токовой нагрузки. В фосфид-галлиевых СИД влияние увеличения тока от 20 до 50 мА на скорость деградации наблюдалось даже большее, чем влияние увеличения температуры от 25 до 70°С [2].

В работе [3] отмечено, что изменение во времени физического состояния, обусловленное необратимыми физико-химическими процессами, является наиболее общей причиной отказов, и что большинству деградационных процессов присущи предвестники отказов в виде изменений характеристик или появления дефектов структуры изделия.

Следует отметить, что в СИД неизвестны случаи отказа катастрофического типа после длительного периода наработки [4].

В работе [5] подробно обсуждаются форсированные испытания СИД, направленные на оценку их надежности. В качестве показателя надежности выбран так называемый медианный ресурс

— время наработки до наступления отказов 50% изделий, а за критерий отказа принято уменьшение силы света СИД на 50%. Для фосфид-галлиевых СИД было установлено, что при температурах до 200°С выполняется условие автоматичности механизмов отказа, что позволяет производить форсированные испытания до этой температуры. Энергия активации деградационного процесса составила 0,61 эВ. Зависимость медианного ресурса определена выражением

$$t_{50} = A j^{-n} \cdot \exp(E_a / k T_{\text{пер}}), \quad (1)$$

где A — постоянный коэффициент;

j — плотность тока;

n — показатель степени, равный примерно единице;

E_a — энергия активации;

k — постоянная Больцмана;

$T_{\text{пер}}$ — температура p - n -перехода.

Медианный ресурс фосфид-галлиевых СИД при нормальных условиях оказался равным $7 \cdot 10^5$ ч. Были получены также значения медианного ресурса для арсенид-галлиевых, арсенид-фосфид-галлиевых и галлий-алюминий-арсенидных СИД.

Таким образом, форсированные испытания фосфид-галлиевых СИД, проведенные по методике [5], позволили установить статистическую характеристику надежности СИД данного типа. Однако они не позволяют прогнозировать надежность отдельных СИД.

С целью определения надежности отдельных СИД нами были предприняты следующие исследования фосфид-галлиевых СИД типа АЛС321А.

Исследуемая партия содержала 50 СИД. Вначале измерялась начальная яркость всех СИД при номинальном токе 20 мА и комнатной температуре. Затем эти приборы подвергались выдержке в форсированном режиме при токе 40 мА. При этом температура активной области повышалась до 150°С, что значительно ускорило процессы деградации.

Температура активной области измерялась относительно комнатной по сдвигу максимума спектра излучения с учетом температурного коэффициента ширины запрещенной зоны фосфида галлия, равного 0,423 мэВ/К. Выдержка в форсированном режиме сопровождалась периодическими (не реже одного раза в сутки) измерениями яркости при номинальном токе 20 мА — до тех пор, пока яркость СИД не уменьшалась в 3—4 раза.

Затем строились графики зависимости логарифма яркости от времени наработки для всех СИД исследуемой партии. Такие графики для нескольких СИД приведены на рис. 1 (начальные яркости приведены к единице). Графики показали, что после на-

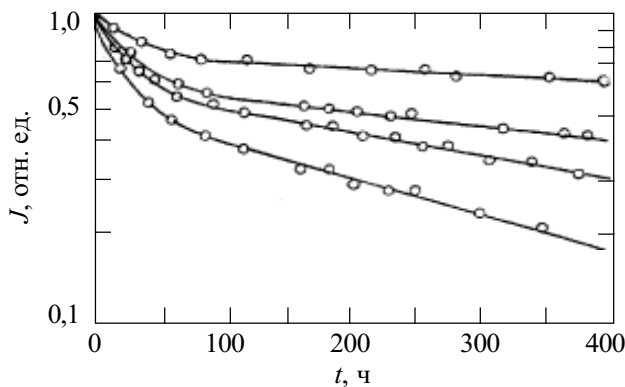


Рис. 1. Зависимость логарифма яркости в номинальном режиме от времени форсированной деградации t для фосфид-галлиевых СИД

начального периода приработки (около 100 ч) зависимость яркости от времени имеет вид

$$J = J_1 \cdot \exp[-(t-t_1)/\tau_\phi], \quad (2)$$

где J_1 — яркость СИД после приработки в течение времени t_1 ; τ_ϕ — постоянная времени форсированной деградации.

Постоянная времени является фундаментальной характеристикой деградационного процесса данного СИД. Ее определяли для всех СИД партии по линейному участку графика:

$$\tau_\phi = (t_2 - t_1) / \ln(J_1/J_2), \quad (3)$$

где J_1 — яркость в момент времени t_1 ; J_2 — яркость в момент времени t_2 .

Для номинального режима постоянная времени получается умножением постоянной времени форсированной деградации на коэффициент ускорения K_y :

$$\tau = \tau_\phi K_y. \quad (4)$$

Коэффициент ускорения при известной энергии активации E_a рассчитывают по формуле

$$K_y = \exp(E_a/kT_n) / \exp(E_a/kT_\phi), \quad (5)$$

где T_n и T_ϕ — температура при нормальном и форсированном режимах, соответственно.

Учитывая формулу (1), полученный по (5) коэффициент ускорения следует умножить на кратность увеличения номинального тока (в нашем случае он равен двум). Коэффициент ускорения в нашем опыте равен 3400, а средний срок службы практически равен медианному ресурсу фосфид-галлиевых СИД, полученному в [5].

При неизвестной энергии активации ее можно определить путем независимых измерений $\tau_{\phi 1}$ и $\tau_{\phi 2}$ при повышенных температурах T_1 и T_2 по формуле

$$E_a = k \cdot \ln K_y / (1/T_1 - 1/T_2), \quad (6)$$

где K_y — коэффициент ускорения в интервале $T_1 - T_2$.

В качестве показателя надежности нами был выбран срок службы — время, за которое яркость СИД на экспоненциальном участке уменьшается в два раза. Срок службы СИД в номинальном режиме определяется по формуле

$$t_0 = \tau \cdot \ln 2 = 0,69\tau. \quad (7)$$

Затем определяется коэффициент начальной деградации по формуле

$$K_d = J_0/J_1, \quad (8)$$

где J_0 — начальная яркость СИД;

J_1 — яркость после наработки 100 ч (приработки).

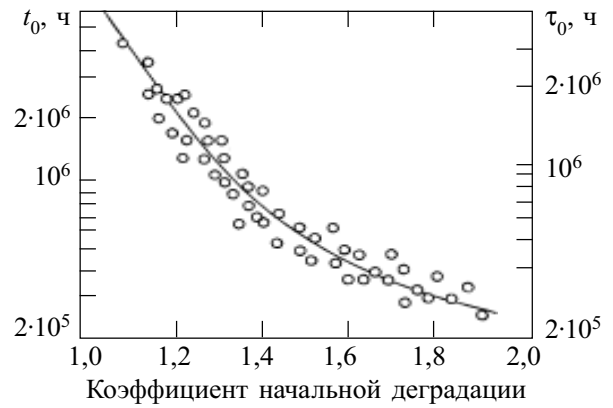


Рис. 2. Зависимость постоянной времени деградации и срока службы СИД от коэффициента начальной деградации

Точки с координатами K_d и τ для всех СИД испытываемой партии были нанесены на график в полулогарифмическом масштабе. Полученная таким образом зависимость приведена на рис. 2, где на правой вертикальной шкале отложена постоянная времени деградации τ , а на левой — срок службы t_0 .

Расположение точек на рис. 2 указывает на наличие корреляции между величинами K_d и τ . Усредненная зависимость показана на графике сплошной линией. По полученному таким образом эталонному графику можно, зная коэффициент начальной деградации K_d , найти срок службы СИД t_0 .

При наличии эталонного графика время отбраковки ненадежных СИД в производстве минимально. Для СИД, срок службы которых требуется определить, проводят измерения начальной яркости при номинальном токе. Затем СИД выдерживают в форсированном режиме приработки в течение 100 ч при увеличенном токе, обеспечивающем заданный режим. Затем вторично измеряют яркость при номинальном токе, вычисляют коэффициент начальной деградации K_d и по эталонному графику находят срок службы для данного СИД. Зная сроки службы измеренных СИД, можно отобрать из них приборы со сроком службы не менее заданного.

Описанный метод отбраковки фосфид-галлиевых СИД предполагает по результатам испытаний относительно небольшого количества изделий построить эталонный график, с помощью которого по двум измеренным значениям яркости (исходной и после форсированной наработки) определить индивидуальный срок службы каждого СИД из данной партии.

Учитывая результаты работы [5], можно рекомендовать описанный нами метод определения индивидуального срока службы СИД, изготовленных также из арсенида галлия, арсенида-фосфида галлия и арсенида галлия-алюминия.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Berg A. A. Bulk degradation of GaP red LEDs // IEEE Trans. Electron Devices.— 1971.— Vol. ED18.— P. 166—170.
2. Коган Л. М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды.— М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. Дубицкий Л. Г. Предвестники отказов в изделиях электронной техники.— М.: Радио и связь, 1989.
4. Гейг С., Эванс Д., Ходапп М., Соренсен Х. Применение оптоэлектронных приборов.— М.: Радио и связь, 1981.
5. Егоров Л. П., Никофоров С. С., Воротинский В. А. Форсированные испытания для оценки надежности светоизлучающих приборов // Электронная техника. Сер. Полупроводниковые приборы.— 1989.— № 7.— С. 113—116.

Л. М. ЗАЙЧЕНКО, к. ф.-м. н. А. И. СЕРЕДЮК,
к. ф.-м. н. В. Д. ФОТИЙ, Ю. Ф. ШЕВЧУК

Украина, г. Черновцы, ОАО "Кварц", КТБ «Фотон-Кварц», Черновицкий
нац. университет; г. Львов, ЛО Института проблем материаловедения
E-mail: photon@argocom.cv.ua

Дата поступления в редакцию
01.07 2003 г. — 09.02 2004 г.

Оппонент к. ф.-м. н. В. А. БОРЩАК
(ОНУ им. И. И. Мечникова, г. Одесса)

СЕНСОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ И НАБОРА ПРОЧНОСТИ ВЯЖУЩИХ СРЕД

Показана возможность создания на базе селенида индия сенсора для контроля вяжущих сред, в том числе композитов.

В задачах непрерывного неразрушающего контроля параметров процесса формирования вяжущих сред (и, в частности, цементного камня), количественного определения времени схватывания смеси и динамики набора прочности используются чувствительные датчики-сенсоры, которые помещаются в контролируемую вяжущую среду, и сравнительно несложная вторичная регистрирующая аппаратура. Кроме того, в процессе эксплуатации нагруженных объектов (консольных балок и др.) возникают локальные упругие и пластические деформации, величина которых существенно влияет на прочностные характеристики конструкций, что также может быть зарегистрировано полупроводниковыми сенсорами.

В традиционных кремниевых и германиевых сенсорах значение коэффициента барической чувствительности K_p не превышает 10^{-10} Па⁻¹, а тензочувствительности — $K_T \leq 10^2$ [1, 2].

В настоящей работе исследуется возможность использования в качестве сенсоров полупроводниковых монокристаллов типа A^3B^6 , которые за счет квазидвумерной слоистой структуры обладают рекордно высокой барической и тензочувствительностью. Так, для монокристаллов селенида индия InSe K_p составляет $10^{-8} \div 10^{-7}$ Па⁻¹, а $K_T = 10^3 \div 10^4$.

Анизотропия свойств, наличие «слабого» вандерваальсовского взаимодействия в межслоевом пространстве и явление «самоочистки» [3, с. 212] обуславливают высокую чувствительность слоистых монокристаллов к внешним механическим воздействиям. Внешние влияния (деформация или всестороннее давление) существенно влияют на «двумерность» матрицы-кристалла и, соответственно, на электрические свойства. Суть явления высокой барической и тензочувствительности слоистых монокристаллов видна из следующего.

В окрестности минимума зоны Бриллюэна в случае невырожденного спектра закон дисперсии имеет вид

$$\varepsilon(\mathbf{k}) = \frac{\hbar^2 k_{\perp}^2}{2m^*} + \beta \cos(k_z d),$$

где ε — энергия электрона в зоне;

\mathbf{k} — волновой вектор электрона;

$$\hbar = \frac{h}{2\pi};$$

h — постоянная Планка;

k_{\perp}, k_z — квазиимпульсы, направленные вдоль и поперек слоев, соответственно;

m^* — эффективная масса, которая характеризует движение электрона в слое;

β — интеграл взаимодействия между слоями;

d — постоянная решетки вдоль гексагональной оси.

При $k_{\perp} = 0$ $\varepsilon = \cos \beta (k_z d)$. Поскольку в «чистых», ненапряженных кристаллах значение интеграла перекрытия β невелико, то максимальная энергия замкнутой изоэнергетической поверхности $\varepsilon_0 = \beta$. Остальные изоэнергетические поверхности являются открытыми. При $\varepsilon \gg \varepsilon_0$ зонный спектр становится двумерным, электроны движутся в слоях, переходы из слоя в слой не происходят. В этом «идеальном» случае квантовым числом является не k_z , а номер слоя s [3, с. 212]. Однако в случае возникновения деформационной «неидеальности» кристалла значение интеграла междуслоевого перекрытия изменяется на несколько порядков, энергетический спектр приближается к трехмерному. Последнее, очевидно, приводит к значительному изменению электрокинетических характеристик низкоразмерного кристалла.

Как известно, в процессе схватывания и набора прочности в цементной смеси возникают внутренние напряжения всестороннего сжатия и деформации, которые и могут быть зарегистрированы данными сенсорами за счет изменения интеграла межслоевого перекрытия в таких монокристаллах [3, 4].

Выращивание полупроводниковых слитков моноселенида индия (InSe) проводилось из предварительно синтезированного материала, взятого в стехиометрической пропорции по методу Бриджмена. Разрезка слитков на шайбы проводилась на установке «Алмаз-4», образцы получены раскалыванием по плоскостям спайности. Контроль параметров (электропроводности, концентрации носителей и их подвижности) проводился для каждой партии материала. Методика изготовления сенсоров и применение последних в датчиках давления, деформации и акселерометрах изложена в [1, 2].

Сенсор для контроля процессов «схватывания» и набора прочности представляет собой полупроводниковый кристалл моноселенида индия ($6 \times 1,5 \times 1$ мм)

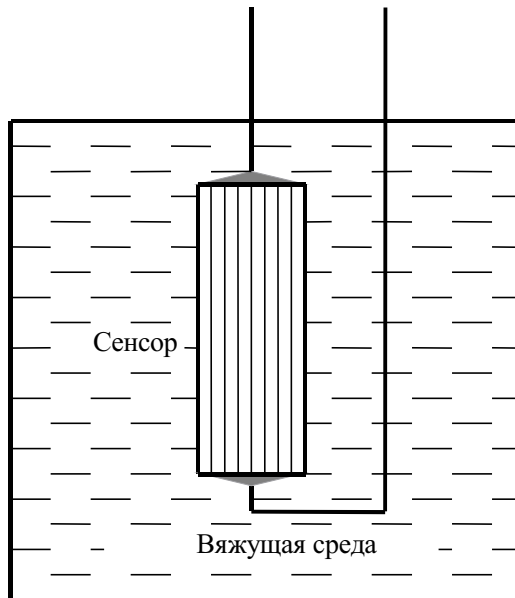


Рис. 1. Измерительная ячейка

с двумя электрическими контактами и диэлектрическим упругим покрытием (рис. 1). Вторичный регистратор — модифицированный потенциометр (в лабораторных условиях могут быть использованы потенциометры типа КСП, КСМ, КСУ и др.). Как вторичный преобразователь могут быть использованы микроконтроллеры «Microchip» типа PIC 16 (17, 18) с соответственно заложенными протоколом измерений и верификацией данных.

Измеряемой величиной является относительное изменение электрического сопротивления сенсора $\Delta R/R$, которое коррелирует с прочностными характеристиками цементного камня. Возможный разброс параметров сенсоров от партии к партии, влияние температуры и других внешних факторов можно устранить программным путем с соответствующей верификацией данных.

Для количественного определения параметров корреляции проведены экспериментальные исследования величины $\Delta R/R$ как функции времени на различных марках портландцемента при разных температурах формирования цементного камня ($-40...+60^{\circ}\text{C}$). Параллельно этим исследованием проведены измерения прочности цементного камня стандартным методом разрушения кубиков-"свидетелей". Для проведения измерений использовалась термоэлектрическая камера ТК-1. Путем сопоставления результатов исследований установлены корреляционные зависимости между величиной $\Delta R/R$ и прочностью для разных температур и марок цемента.

Типичная временная зависимость относительного изменения сопротивления сенсора в вязущей среде имеет вид, представленный на рис. 2. Участки монотонного увеличения и экстремума отвечают моментам «схватывания», а в области за перегибом — характеризуют набор прочности цементного камня.

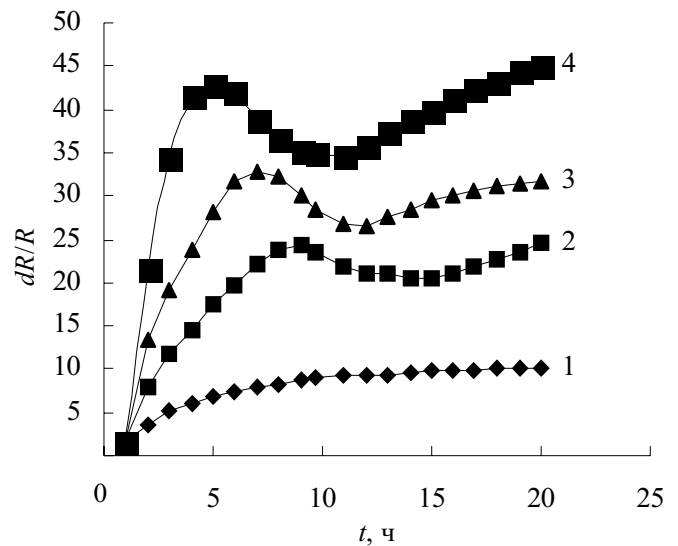


Рис. 2. Временная зависимость $\Delta R/R$ сенсора при различной температуре формирования портландцемента М-400: 1 — -20°C ; 2 — 0°C ; 3 — 20°C ; 4 — 40°C

Отдельно установлены критерии распознавания процессов «схватывания» (т. е. образования кристаллогидратов в цементном камне) и кристаллизации свободной воды в смесях при отрицательных температурах, что представляется важным при зимних условиях строительства объектов.

Проведенные исследования могут быть основой для разработки и внедрения серийных неразрушающих систем с чувствительными датчиками на основе полупроводниковых кристаллов A^3B^6 для контроля процессов «схватывания» и набора прочности в области строительства и эксплуатации нагруженных объектов, гидротехнических сооружений, нефтяных и газовых скважин и др.

Полученные зависимости и сам метод контроля могут быть использованы и для другого типа вязущих сред и компаундов, в частности, для анализа и контроля состояния высокостабильных изделий полупроводниковой техники, залитых в различные компаунды.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. А. с. 1384133 СССР. Полупроводниковый преобразователь давления / З. Д. Ковалюк, В. К. Лукьянюк, А. И. Середюк и др. — 1988.
2. А. с. 1354928 СССР. Чувствительный элемент преобразователя давления / В. В. Драгомерецкий, З. Д. Ковалюк, М. Н. Пырля и др. — 1988.
3. Товстюк К. Д. Полупроводниковое материаловедение. — Киев: Наук. думка, 1984.
4. Драгомерецкий В. В., Ковалюк З. Д., Пырля М. Н., Середюк А. И. Исследование электронных спектров в интеркалатах InSe / Тез. докл. Второго всесоюз. симпозиума «Неоднородные электронные состояния». — Новосибирск. — 1987. — С. 260—261.

Д. ф.-м. н. З. А. ИСКЕНДЕР-ЗАДЕ, к. ф.-м. н. М. Р. АХУНДОВ,
к. ф.-м. н. Э. А. ДЖАФАРОВА, к. ф.-м. н. Ш. А. АЛИХАНОВА

Азербайджанский технический университет, Институт физики
НАН Азербайджана, г. Баку
E-mail: ssddb@azerin.com

Дата поступления в редакцию
04.12.2003 г.

Оппонент к. ф.-м. н. В. В. КОВАЛЬЧУК
(ЮГПУ им. К. Д. Ушинского, г. Одесса)

ЭФФЕКТЫ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ И ПАМЯТИ В МОП-СТРУКТУРАХ Al-SiO₂-Si

Показана возможность практического применения Al-SiO₂-Si-структур в создании стабильных и управляемых элементов памяти.

Переключение с памятью в аморфных и поликристаллических полупроводниках, обусловленное возникновением кристаллического проводящего шнура между электродами [1], не отличается стабильностью характеристик — вследствие активного взаимодействия большинства халькогенидных материалов с металлами, приводящего к их растворению. Наиболее перспективным материалом для создания переключающих элементов является кремний, причем собственно переключателями в нем могут быть области с неупорядоченной структурой (SiO₂, поликремний, α-Si), а монокристаллические участки могут служить для изготовления в них активных элементов интегральных схем обработки сигналов [2, 3].

В настоящей работе исследуются структуры Al-SiO₂-Si с целью выяснения возможности их практического применения в создании стабильных и управляемых элементов памяти.

Исследуемые структуры Al-SiO₂-Si изготавливались в сэндвичевом исполнении на основе кремниевых пластин *p*- и *n*-типов проводимости с различным удельным сопротивлением, соответствующим значению сопротивления, применяемого для изготовления логических и аналоговых интегральных схем.

Оксиды SiO₂ на полированных и химически обработанных пластинках Si толщиной 250—300 мкм были получены: а) термическим окислением во влажном кислороде; б) термическим окислением в атмосфере сухого кислорода; в) пиролитическим осаждением при термическом разложении тетраэтоксисилана. Толщина окисного слоя варьировалась в интервале 0,1—0,8 мкм. Контроль толщины окисла, устанавливаемый выбором режима окисления, осуществлялся оптическим и емкостным методами. После напыления алюминия с помощью фотолитографии формировались затворы различного диаметра.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) структур исследовались в статическом и динамическом режимах в интервале температур 77—460 К.

В исходном высокоомном состоянии образцов на *n*- и *p*-Si, окисел которых выращивался термическим и пиролитическим путями, соответственно, токи до определенного критического значения напряжения ($U_{пор}$)

весьма малы и подчиняются закону $I \sim U^{3/2}$ и $I \sim U^3$ (рис. 1, кривые а, б). Из измерений при $U=5$ В оценено удельное сопротивление окисной пленки SiO₂ — оно составляет 10^{15} — 10^{16} Ом·см. Анализ ВАХ показывает, что, во-первых, в высокоомном состоянии перенос заряда через исследованные структуры обусловлен током, ограниченным пространственным зарядом, и, во-вторых, пиролитические пленки более дефектны, и ловушки в них, вероятно, распределены неравномерно.

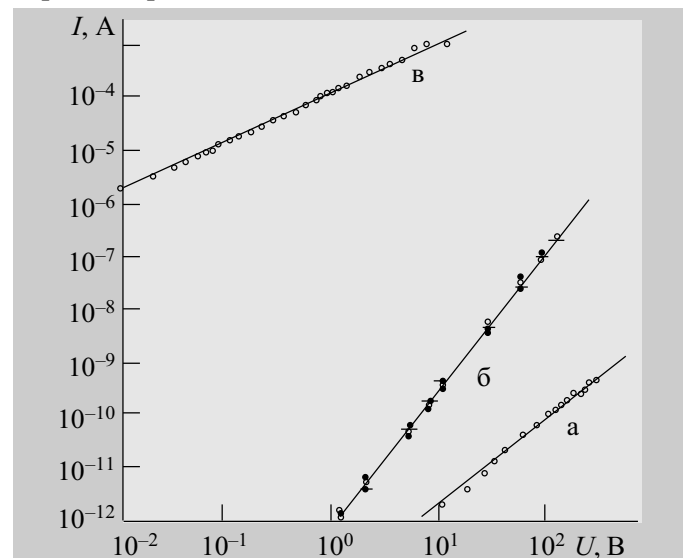


Рис. 1. ВАХ структур Al-SiO₂-Si при комнатной температуре:

а, б — исходное закрытое состояние; в — открытое состояние

Начиная со значения напряжения $U_{пор}$ величина тока скачком возрастает от 10^{-9} до 10^{-3} А, т. е. структура переходит из высокоомного состояния (ВС) в низкоомное (НС) (рис. 1, кривая в). В последнем состоянии структура может находиться произвольно долго. Переключение структуры из ВС в НС происходит при подаче постоянного и импульсного напряжений различной формы и длительности.

Экспериментально обнаружено, что напряжение первого включения структур линейно зависит от толщины окисного слоя (рис. 2). После первого переключения напряжение $U_{пор}$ несколько уменьшается и в дальнейшем почти не меняется с числом переключений, т. е. происходит как бы формовка структур. Напряжение переключения практически не зависит от исходного удельного сопротивления кремниевой подложки и температуры в интервале 77—460 К.

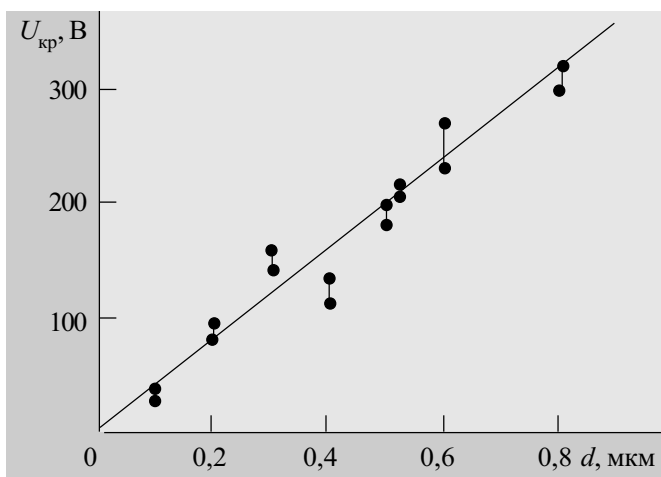


Рис. 2. Зависимость напряжения переключения $U_{кр}$ от толщины окисной пленки d

В состоянии НС ВАХ структур на основе p -Si симметрична и линейна, а сопротивление структуры практически не зависит от температуры и изменяется в пределах $0,1—2,0$ кОм для различных образцов и при разном числе переключений. После переключения из ВС в НС остаточное напряжение составляет $U_{ост} \approx 5...10$ В при токе $I_{ост} \approx 2,5...5,0$ мА. Переход из НС обратно в ВС происходит при подаче одиночного импульса с амплитудой $50—100$ В и длительностью $5—10$ мкс. Максимальное число переключений (примерно 10^6) наблюдается в образцах с толщиной окисла $0,6—0,8$ мкм, полученного в атмосфере сухого кислорода, что, по-видимому, объясняется тем, что такие окисные пленки более плотны, имеют меньше дефектов и обладают более низкой концентрацией поверхностных состояний на границе раздела с кремнием.

Для структур на основе n -Si в НС в зависимости тока от напряжения наблюдается сильная асимметрия (диодная характеристика) с коэффициентом выпрямления $10^4—10^6$ при $U=1$ В, причем прямой и обратный токи зависят от температуры (рис. 3).

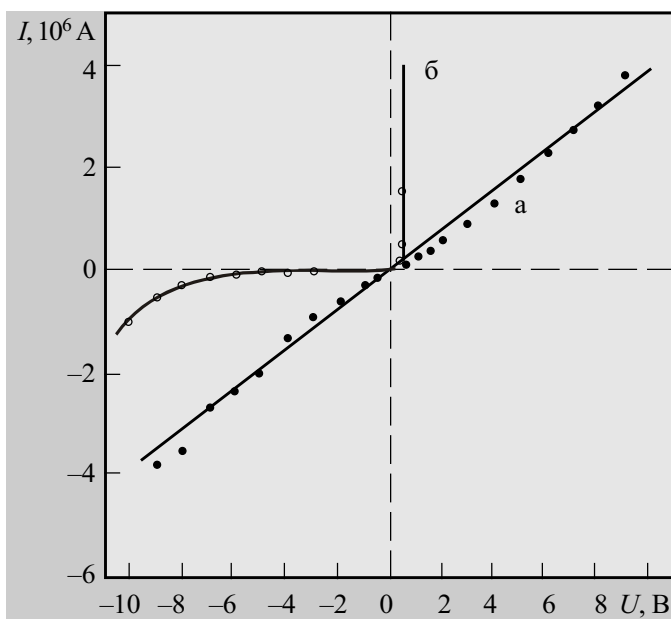


Рис. 3. ВАХ структур $Al-SiO_2-n-Si$ при комнатной температуре:

a — закрытое состояние; b — открытое состояние

Исследования показывают, что токи через структуру в высокопроводящем состоянии на основе как p -Si, так и n -Si, не зависят от площади металлического контакта и удельного сопротивления исходного кремния.

Нами исследована также кинетика переключения. Эти исследования позволяют получить весьма ценную информацию о физике процессов, ответственных за эффект переключения и памяти. Переходные процессы характеризуют быстродействие структуры, которое необходимо учитывать при определении сфер применения переключающих элементов в устройствах электроники.

Исследования проводились в режиме одиночного импульса и на импульсах большой скважности. При этом на экране двухкоординатного осциллографа одновременно наблюдались падение напряжения и ток через структуры.

До значения напряжения переключения структура находится в высокоомном состоянии, поэтому приложенное напряжение полностью падает на образце, и форма выходного импульса повторяет форму исходного. При достижении напряжения $U_{пор}$ переключение начинается с конца импульса с задержкой $\tau_{зд}$. При постоянной длительности импульса с увеличением его амплитуды $\tau_{зд}$ включения уменьшается. В предельном значении порогового напряжения переключение происходит почти без задержки на переднем фронте импульса.

Исследования показывают, что не только время задержки, но и собственное время включения ($\tau_{вкл}$, τ_0) экспоненциально уменьшаются с ростом амплитуды импульса напряжения и выражаются эмпирическими формулами $\tau_{зд} = \tau_{з0} \exp(-\alpha U)$ и $\tau_{вкл} = \tau_0 \exp(-\beta U)$, где для различных образцов $\alpha = 0,13...0,15$ В⁻¹, задержка включения при малых амплитудах импульса $\tau_{з0} = (1...3) \cdot 10^{-3}$ с, $\beta = 0,16...0,18$ В⁻¹, $\tau_0 = (5...8) \cdot 10^{-4}$ с.

Во всех исследованных структурах $\tau_{зд}$ на порядок больше собственного времени включения.

Экспериментальные факты показывают, что для переключения структур в НС необходима определенная энергия, которая накапливается во время задержки, причем необходимым условием переключения является величина тока.

Обобщая экспериментальные данные, можно сказать, что процессы задержки и переключения в структурах $Al-SiO_2-Si$ обусловлены электронным механизмом, причем доминирующим механизмом переключения является ударная ионизация. В сильных электрических полях ($E \geq 10^6$ В/см) электроны, эмитированные из алюминиевого электрода в пленку SiO_2 , при столкновении ионизируют атомы и молекулы и в результате приводят к лавинному размножению носителей, т. е. пробое окисной пленки. Так как пленка SiO_2 , как правило, дефектна, то пробой происходит по микроплазмам, что подтверждается колебаниями тока и напряжения в момент включения. С другой стороны, инжектированные носители захватываются глубокими уровнями, что приводит к появлению задержки переключения.

Если выделяемого при пробое тепла недостаточно для расплавления электродного материала, то переключение носит моностабильный характер, что со-

гласуется с экспериментальными результатами, полученными при исследовании структур в импульсном режиме. А если в момент переключения выделяется достаточная энергия, то локальная температура системы возрастает настолько, что в области выделения этой энергии структура SiO_2 разрушается и заполняется расплавленным материалом электрода. Последний, в свою очередь, под действием электрического поля и локально выделяемого тепла переносится через окисную пленку к подложке, образуя металлический микроканал диаметром 1—3 мкм. Эти предположения подтвердились также тем, что в случаях, когда атомы алюминия проникали в подложку, в ней образовывался $p-n$ -переход, как показало электронно-микроскопическое исследование.

Экспериментально обнаружено, что при воздействии на структуру одиночными импульсами порогового напряжения при относительно высоких значениях ограничивающего сопротивления $R_{огр}$ с конца импульса возникают осцилляции напряжения и тока. С увеличением амплитуды импульса на $\Delta U \leq 5$ В число колебаний возрастает и они постепенно заполняют весь импульс. В случае термического окисла наблюдаются колебания почти синусоидальной формы, а для пиролитического окисла осцилляции тока и напряжения носят релаксационный характер. Осцилляции тока и напряжения наблюдаются и при низких частотах ($f \leq 50$ Гц). Частота колебаний тока и напряжения возрастает с ростом приложенного напряжения и для большинства структур составляет 0,4—1,0 МГц. Более стабильные колебания наблюдаются в структурах с пиролитическим окислом.

Эти явления качественно могут быть объяснены следующим образом. Так как осцилляции тока и напряжения обнаруживаются только при относительно

высоком значении ограничительного сопротивления $R_{огр}$ и узком интервале напряжения ($\Delta U \leq 5$ В), то ясно, что ток, текущий через структуры, недостаточен для удержания системы в НС. Увеличение тока через структуру приводит к перераспределению напряжения между $R_{огр}$ и структурой, которое, в свою очередь, приводит к уменьшению тока и повторному перераспределению напряжения, т. е. наблюдается осцилляция. Наблюдаемые осцилляции могут быть связаны также с дефектностью пленки SiO_2 , т. е. перезарядкой глубоких примесных центров, т. к. в наиболее дефектных пиролитических структурах наблюдаются наиболее устойчивые осцилляции. Осцилляция не связана с тепловыми эффектами, т. к. с ростом частоты импульсов напряжения влияние тепловых эффектов растет и структура переходит в НС без осцилляции.

Таким образом, проведенные исследования показали возможность использования кремниевых МОП-структур в качестве стабильных элементов памяти, конструктивно и технологически согласующихся с изготовлением ИС хранения и обработки информации.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Милов А. А. Переключающие приборы на основе аморфных полупроводниковых материалов // Электронная техника. Сер. Микроэлектроника.— 1971.— Вып. 3.— С. 3—13.
2. Касимов Ф. Д. Физические свойства и функциональные возможности локальных пленок моно- и поликремния // Тез. докл. 12-й Всесоюз. конф. по микроэлектронике. Ч. 2.— Тбилиси.— 1987.— С. 175—176.
3. Abdullayev A. G., Kasimov F. D. The simultaneous growth of mono- and polycrystalline silicon films // Thin Solid Films.— 1984.— Vol. 115, N 3.— P. 237—243.



Украинский проспект электроники

<http://tkoe.wallst.ru/elektroniks.html>

Научно-производственное предприятие “Карат”



79031, г. Львов, ул. Стрийська, 202,
тел. 63-10-65, 63-83-03, факс: 63-22-28, 63-50-69
E-mail: carat@novas.lviv.ua

Научно-тематическое направление деятельности предприятия — материалы электронной техники.

Основные виды продукции:

материалы микроэлектроники, керамические материалы электронной техники, материалы оптоэлектроники, квантовой электроники и оптики, материалы акустоэлектроники, магнитоэлектроники, криоэлектроники, технологические материалы для монтажно-сборочных работ и печатных плат.

Услуги: испытания, тестирование и сертификация материалов в аккредитованной Госстандартом Украины лаборатории.

Д. ф.-м. н. М. М. ЗАРБАЛИЕВ, д. ф.-м. н. Н. Ф. ГАХРАМАНОВ,
Н. С. САРДАРОВА, Г. А. ГЕЙДАРОВА

Азербайджан, Сумгаитский государственный университет
E-mail: ssddb@azerin.com

Дата поступления в редакцию
27.10 2003 г.

Оппоненты к. ф.-м. н. В. Д. ФОТИЙ
(КТБ "Фотон-Кварц", г. Черновцы),
к. ф.-м. н. В. Б. ОРЛЕЦКИЙ
(ЧО ИПМ, г. Черновцы)

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ СИСТЕМЫ $TlInTe_2—TlYbTe_2$

Сплавы представляют практический интерес с точки зрения использования в качестве p -ветви термопар в термогенераторах.

Глубокое охлаждение объектов небольших размеров с использованием термоэлектрических или термомагнитных устройств представляет важную задачу. Обычно для этих целей используют термоэлектрическую пару сплава висмута с сурьмой (для отрицательной ветви) и твердые растворы на основе теллурида висмута и сурьмы (p -ветвь).

В работах [1—4] исследованы электрофизические свойства широкого спектра материалов, из которых следует, что твердые растворы тройных халькогенидов с лантаноидами $TlIn_{1-x}Ln_xTe_2$ обладают высоким коэффициентом термоэффективности в области средних температур (500—1000 К) и могут служить в качестве p -ветви термопар в термогенераторах. Представляет интерес и исследование твердых растворов $TlIn_{1-x}Yb_xTe_2$, в некоторой степени близких к теллуриду висмута.

В настоящей работе исследуются электропроводность, термо-эдс, теплопроводность сплавов системы $TlInTe_2—TlYbTe_2$ и зависимость термоэффективности твердых растворов этой системы от состава и температуры.

Методика эксперимента

Объектами исследования являются монокристаллы твердых растворов $TlIn_{1-x}Yb_xTe_2$, где $0 \leq x \leq 0,11$, и полукристаллы тройного $TlYbTe_2$ - и четверного $Tl_2InYbTe_4$ -соединений. Взаимодействие в системе $TlInTe_2—TlYbTe_2$ подробно рассмотрено в работе [1], из которой следует, что данная система является квазибинарным сечением четверной системы $Tl—In—Yb—Te_2$. При соотношении исходных компонентов 1:1 образуется четверное соединение $Tl_2InYbTe_4$, а область растворимости простирается до 11 мол.% $TlYbTe_2$ при комнатной температуре.

Образцы получали прямым синтезом в вакуумированных до 10^{-2} Па кварцевых ампулах. Печь постепенно нагревали до температуры (T) 1200—1300 К в зависимости от состава смеси, выдерживали при этой температуре 8—10 ч (чем выше содержание иттербия в составах, тем дольше время выдержки), после чего со скоростью 10—15 К/ч охлаждали до комнатной температуры.

Для выращивания монокристаллов метод обычной зонной перекристаллизации оказался неэффективным — по той причине, что давление паров при плавлении хотя и не создает опасности взрыва кварцевых ампул, но, тем не менее, при локальном плавлении вызывает частичное испарение, а в некоторых случаях даже разложение их состава. Нарушение стехиометрии, конденсация на холодных стенках ампул и другие факторы препятствуют нормальному росту кристаллов. При кристаллизации из расплава избыточный теллур частично захватывается растущим кристаллом, а частично отгесняется в расплав [5, 6]. Захваченный твердой фазой теллур выделяется в виде включений второй фазы.

Если кристаллизация однофазная, то, пренебрегая отклонением от стехиометрии, можно считать, что весь избыточный теллур переходит в расплав, т. е. коэффициент распределения теллура в данном разрезе близок к нулю. При зонной перекристаллизации расплав постоянно подпитывается твердой фазой, в которой может содержаться избыток теллура. При допущении Пфана и предположении близости коэффициента распределения избыточного теллура в твердых растворах $TlIn_{1-x}Yb_xTe_2$ к нулю можно показать, что в первом приближении концентрация теллура в расплаве зоны длиной L на расстоянии x от начала перекристаллизации слитка со стартовой концентрацией теллура C_0 равна $C=C_0(1+x/L)$.

Состав растущего кристалла связан с составом расплава через коэффициенты распределения компонентов, определяемые солидусом, так же, как тип и концентрация дефектов в кристалле. Поэтому при исследовании распределений параметров по зонно-перекристаллизованным слиткам $TlIn_{1-x}Yb_xTe_2$ фактически исследуется зависимость свойств твердых растворов от избыточного теллура в расплаве.

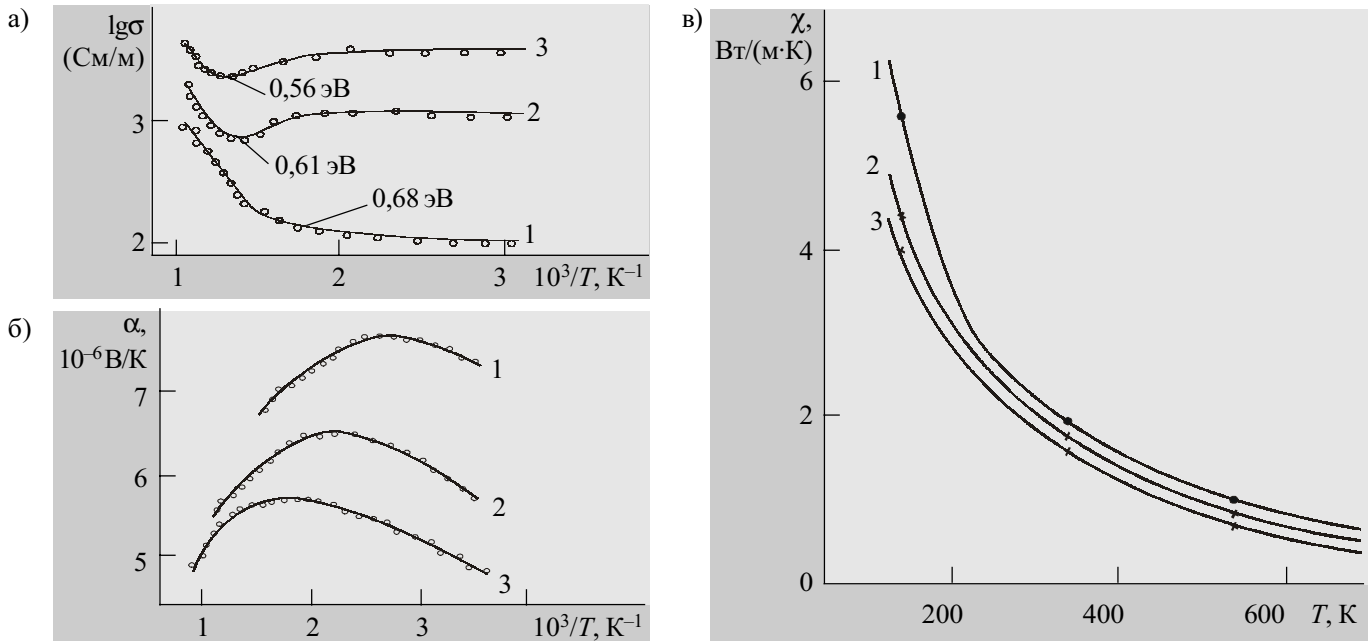
Метод направленной кристаллизации Бриджмена оказался наиболее эффективным для выращивания монокристаллов твердых растворов $TlIn_{1-x}Yb_xTe_2$. О монокристалличности выращенных кристаллов судили по снятым лауэграммам. Данные химического анализа показали, что составы полученных монокристаллов соответствуют формульным.

Измерения электропроводности (σ), коэффициента термо-эдс (α) проводили на постоянном токе компенсационным методом. Теплопроводность (χ) измеряли стационарным методом.

Точность измерения σ , α и χ составляла 1,5, 5 и 6%, соответственно.

Результаты и их обсуждение

Как было показано в [1], данное соединение кристаллизуется в тетрагональной сингонии в решетке $TlInTe_2$. При частичном замещении атомов индия атомами иттербия параметры элементарных ячеек сплавов $TlIn_{1-x}Yb_xTe_2$ увеличиваются аддитивно. Это вызвано тем, что в кристаллической решетке $TlInTe_2$ трехвалентные ионы индия замещаются ионами иттербия, обладающими относительно большим радиусом.



Температурная зависимость электропроводности σ (а), коэффициента термо-эдс α (б) и теплопроводности χ (в) образцов твердых растворов $\text{TlIn}_{1-x}\text{Yb}_x\text{Te}_2$ с $x=0,02$ (1), 0,05 (2) и 0,08 (3)

На рисунке приведены температурные зависимости σ и α твердых растворов системы TlInTe_2 — TlYbTe_2 . Исследованные образцы во всем температурном интервале обладают p -типом проводимости.

Отличия температурных зависимостей, связанные с увеличением содержания иттербия в составе сплавов, объясняются тем, что в TlInTe_2 валентная зона образована, в основном, расщепляющимися $5p$ -уровнями теллура, частично $5p$ -, $5s$ -уровнями индия и $6p$ -уровнями таллия, а зона проводимости — $5p$ -, $5s$ -уровнями индия и $6p$ -уровнями таллия. При частичном замещении атомов индия атомами иттербия в зону проводимости попадают и d -состояния атомов иттербия, которые энергетически расположены несколько выше. В твердых растворах $\text{TlIn}_{1-x}\text{Yb}_x\text{Te}_2$ валентные электроны иттербия частично переходят в коллективизированные состояния (за счет стремления к образованию f^{14} -состояния), что вызывает сильные электронные взаимодействия и разрыхление решетки.

На рисунке приведены также температурные зависимости теплопроводности исследованных образцов. Измеренная величина теплопроводности обусловлена решеточным вкладом, т. к. ее электронная составляющая, рассчитанная по соотношению Видемана—Франца, не превышает 1% от общей теплопроводности.

В твердых растворах $\text{TlIn}_{1-x}\text{Yb}_x\text{Te}_2$ наблюдается слабая зависимость $\chi \sim T^{-n}$ ($n < 1$) во всем исследованном интервале температур, что указывает на преобладание процессов рассеяния на дефектах кристаллической решетки. Значительное уменьшение теплопроводности в зависимости от состава твердых растворов $\text{TlIn}_{1-x}\text{Yb}_x\text{Te}_2$ объясняется тем, что с переходом от соединения TlInTe_2 с упорядоченным расположением атомов к твердым растворам на его основе наблюдается отклонение от обычной закономерности изменения теплопроводности от атомного веса. Данное обстоятельство вызвано тем, что для смешанных кристаллов переменного состава $\text{TlIn}_{1-x}\text{Ln}_x\text{X}_2$ пре-

валирует рассеяние фононов от локальных точечных дефектов, и основным фактором, влияющим на тепловое сопротивление, является локальное изменение плотности и упругих свойств среды. Локальное изменение плотности, в основном, зависит от разности средних атомных весов, а локальное изменение упругих свойств — от разности атомных радиусов растворителя (TlInTe_2) и растворенного вещества (TlYbTe_2).

Кристаллы твердых растворов $\text{TlIn}_{1-x}\text{Yb}_x\text{Te}_2$ представляют нам следствием частичного замещения разноименных элементов катионов на базе решетки тройного соединения TlInTe_2 , что подкрепляется также результатами структурных и электрофизических исследований. В результате частичного замещения атомов индия атомами иттербия в соединении TlInTe_2 природа межатомных связей остается совершенно без изменения, т. к. атомы замещения изовалентны между собой, но существенно различаются по массе.

Результаты интерпретированы в рамках теории, учитывающей роль трехфононных процессов переброса (U -процессов) и нормальных процессов (N -процессов), а также точечных дефектов в рассеянии фононов. Установлено, что в твердых растворах $\text{TlIn}_{1-x}\text{Yb}_x\text{Te}_2$ в рассеянии фононов одновременно с U -процессами активную роль играют нормальные процессы и рассеяние на точечных дефектах.

Из экспериментальных данных видно, что в твердых растворах $\text{TlIn}_{1-x}\text{Yb}_x\text{Te}_2$ с ростом содержания иттербия электропроводность возрастает почти на два порядка, а теплопроводность убывает. Поэтому можно было ожидать, что в определенных составах и температурном интервале термоэлектрическая эффективность (z) достигнет величины, представляющей практический интерес.

Расчеты показывают, что при температурах 500—1000 К в некоторых составах термоэффективность составляет $(2,55 \dots 3,26) \cdot 10^{-3}$ К. Наибольшим значением термоэффективности в указанном интервале температур обладает твердый раствор $\text{TlIn}_{0,9}\text{Yb}_{0,1}\text{Te}_2$ (см. таблицу).

Термоэлектрическая эффективность твердых растворов $TlIn_{1-x}Yb_xTe_2$ при различной температуре

x	При 500 К				При 700 К				При 900 К			
	$\alpha, 10^{-6}$ В/К	$\sigma,$ См/м	$\chi,$ $\frac{Вт}{м \cdot К}$	$z, 10^{-3}$ К ⁻¹	$\alpha, 10^{-6}$ В/К	$\sigma,$ См/м	$\chi,$ $\frac{Вт}{м \cdot К}$	$z, 10^{-3}$ К ⁻¹	$\alpha, 10^{-6}$ В/К	$\sigma,$ См/м	$\chi,$ $\frac{Вт}{м \cdot К}$	$z, 10^{-3}$ К ⁻¹
0,05	670	1445	0,79	0,92	780	832	0,59	0,86	560	920	0,56	0,52
0,09	650	1786	0,74	2,73	760	2630	0,57	2,67	540	2870	0,54	1,55
0,10	620	2630	0,60	1,68	690	3700	0,54	3,26	530	3340	0,51	1,84

Выводы

Таким образом, исследованием коэффициентов электропроводности, термоэлектродвижущей силы и теплопроводности твердых растворов системы $TlInTe_2-TlYbTe_2$ установлено, что с ростом содержания иттербия в растворах термоэффективность увеличивается и при температурах 500—1000 К достигает величины, представляющей практический интерес — $(2...3)10^{-3} К^{-1}$ — и могут служить в качестве *p*-ветви термопар в термогенераторах.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Зарбалиев М. М. Твердые растворы замещения в системе $TlInTe_2-TlYbTe_2$ // Доклады РАН. Неорганич. материалы.— 1999.— Т. 35, № 5.— С. 560—564.

2. Зейналов Г. И., Зарбалиев М. М., Сардарова Н. С. Электрофизические свойства сплавов системы $TlInS_2-TlYbS_2$ // Там же.— 1999.— Т. 35, № 8.— С. 913—916.

3. Зарбалиев М. М. Твердые растворы $TlIn_{1-x}Yb_xS_2$ // Там же.— 2000.— Т. 36, № 5.— С. 619—623.

4. Зарбалиев М. М. Особенности электрических свойств твердых растворов $TlIn_{1-x}Yb_xS_2 (Te_2)$ // Физика. (АН Азерб. респуб.)— 1999.— Т. 35, № 3.— С. 26—29.

5. Абрикосов Н. Х., Банкина В. Д., Порецкая Л. В. и др. Полупроводниковые халькогениды и сплавы на их основе.— М.: Наука, 1975.

6. Yim W. M., Rost F. D. Compound telluride's and their alloys for peltier cooling // Solid- State Electron.— 1972.— Vol. 15.— P. 1121—1140.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

**14-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»
13—17 сентября 2004 года, г. Севастополь**

**Черноморский филиал Московского государственного университета
и Севастопольский национальный технический университет**

ТЕМАТИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ

1. Твердотельные приборы и устройства СВЧ (в том числе интегрированные устройства для средств связи и локации, а также для сопряжения с оптоволоконными и цифровыми устройствами).

2. Электроракуумные и микровакуумные приборы СВЧ.

3. Системы СВЧ-связи, вещания и спутниковой навигации (в том числе методики оценки эффективности сетей связи).

4. Антенны и антенные элементы (в том числе оптические технологии в антенной технике).

5. Пассивные компоненты, материалы, технология изготовления СВЧ-приборов и нано-

технология (в том числе устройства на магнитостатических волнах).

6. СВЧ-электроника сверхбольших мощностей и эффекты.

7. СВЧ-измерения.

8. СВЧ-техника в промышленности и на транспорте.

9. Радиоастрономия, дистанционное зондирование и распространение радиоволн.

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

14-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии"
13-17 сентября 2004 г., Севастополь, Украина



September 13-17, 2004, Sebastopol, Ukraine
14th International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology"

Для получения более детальной информации:

тел.: +380-692-440982;
+380-692-424287;

e-mail: crimico_2004@optima.com.ua

<http://ieee.orbita.ru/aps/crim04r.htm>

Открытое акционерное общество

«Центральное конструкторское бюро «Ритм»



ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Разработка и серийное изготовление:

- одно- и многоэлементных фотоприемников (в т. ч. охлаждаемых) методами планарной технологии и выращиванием полупроводниковых слоев;
- фотоприемных устройств (фотоприемники с предварительным усилением фотосигнала);
- оптоэлектронных пар.

Разработка и изготовление гибридных печатных плат и оптических фильтров.

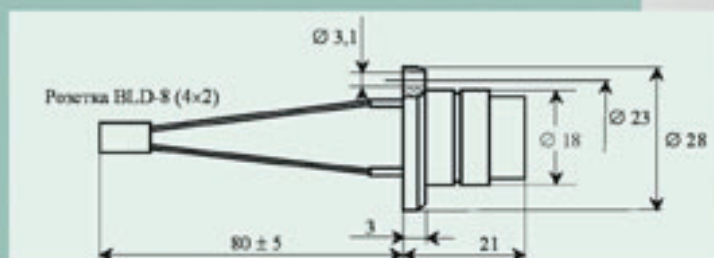
Разработка конструкторской документации, в т. ч. для изготовления фотошаблонов.

Фотометрические исследования и поверка фотометрических приборов.

ФОТОРЕЗИСТОР УФРО2

(ТУ У 31-044-020-2000)

Фотоэлектрические параметры
и надежные характеристики
на уровне лучших мировых аналогов



- Фоторезистор на основе PbSe
- Герметичный металлостеклянный корпус с плоским входным окном из лейкосапфира
- Охлаждаемая диафрагма
- Минимальная наработка 10000 ч
- Сохраняемость 5 лет

ПРИМЕНЯЕМОСТЬ

- ИК-спектрофотометрия
- Медицинская томография
- Дистанционный тепловой контроль объектов
- Диагностика букс и тормозных колодок подвижного ж/д состава

ОСНОВНЫЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Площадь фоточувствительного элемента, мм ²	1×1
Рабочее напряжение, В	30
Удельная обнаружительная способность в максимуме спектральной чувствительности, см·Гц ^{1/2} ·Вт ⁻¹ , не менее	3·10 ¹⁰
Вольтовая чувствительность на длине волны 2,5 мкм, В/Вт, не менее	2·10 ⁴
Область спектральной чувствительности (Δλ), мкм	0,8–4,7
Постоянная времени, мкс, не более	50



Український преспект електроніки

<http://tkoo.wulfst.ru/elektronika.html>

Вышел
в свет

ЖИВАЯ электроника РОССИИ 2004



**ОТРАСЛЕВОЙ
ДЕЛОВОЙ ЕЖЕГОДНИК**
ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ,
ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Москва, 109044, з/я 14
Санкт-Петербург, 197101, Большая Пушкарская, 41
Телефон: (095) 741-7701
Факс: (095) 741-7702
Тел./факс: (812) 232-9825
<http://www.eicp.ru>
e-mail: elcom@ecomp.ru

Вам понравился номер. Тогда:

- продлите подписку на журнал по одному из адресов, приведенных на 2-й стр. обложки;
- напишите письмо в редакцию.



Вам не понравился номер. Тогда:

- напишите письмо в редакцию;
- продлите подписку на журнал по одному из адресов, приведенных на 2-й стр. обложки.