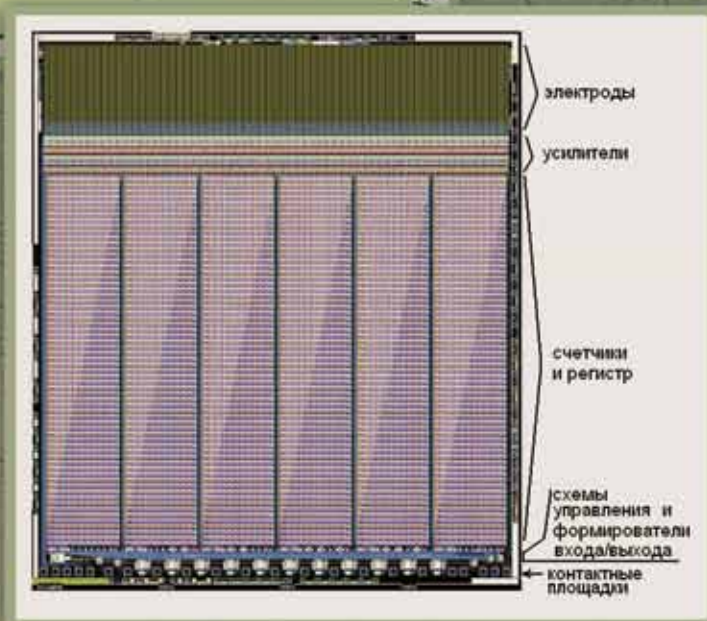
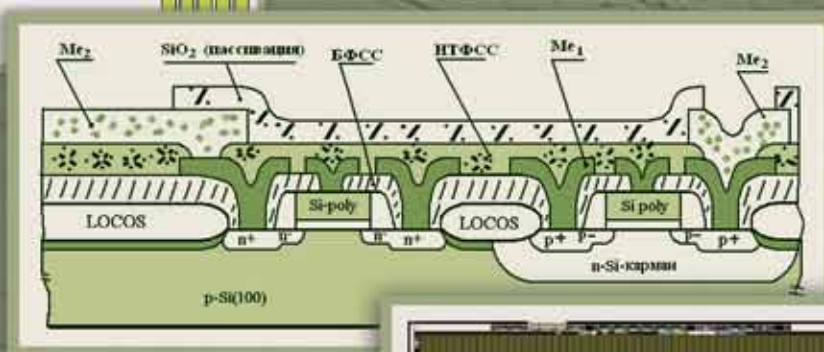
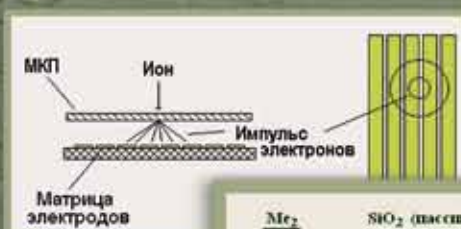


Технология и конструирование в электронной аппаратуре



К статье «СБИС для
микроэлектронного
координатно-чувствительного
детектора приборов
элементного анализа материалов»

2(80) 2009

ДЕСЯТАЯ
МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ



СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

18—22 мая 2009 года
Украина, г. Одесса

Реквизиты для связи
e-mail <tkea@optima.com.ua>
тел. +38 (048) 728-49-46,
728-18-50.

- Информационные технологии и системы искусственного интеллекта
- Компьютерные системы и сети
- Радиотехнические, телекоммуникационные и телевизионные системы
- Проектирование, конструирование, производство и контроль электронных средств
- Функциональная электроника. Микро- и нанотехнологии
- Проблемы экологического мониторинга и медицинской диагностики
- Проблемы инженерной педагогики высшей школы
- «Круглый стол» Проблемы развития микроэлектроники в Украине — состояние и перспективы
- Семинары:

Опыт регионального сотрудничества с IEEE
Исследования молодых ученых в области информационных технологий
Применение информационных технологий при изучении дисциплин по биомедицинской электронике

*С текущей информацией
можно ознакомиться на сайте
www.tkea.com.ua/siet/inf.html*

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

Выходит один раз в 2 месяца

Регистрационный номер КВ 13418-2302ПР

Зарегистрирован в ВАК по разделам «Физико-математические науки», «Технические науки»
Реферируется в УРЖ «Джерело» (г. Киев) и в Реферативном журнале ВИНИТИ (г. Москва)



Журнал издается при поддержке
ЗАО «Укрналит», НИИ «Орион»,
ОАО «Меридиан» им. С. П. Королёва
(г. Киев),
НПП «Карат» (г. Львов),
ЦКБ «Ритм» (г. Черновцы)

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

В Украине Отделения связи. «Каталог видань України». Индекс 23785.
Подписное агентство «Идея», www.idea.com.ua. Индекс 11146.
Подписное агентство «KSS», www.kss.kiev.ua. Индекс 20363.
В России Отделения связи. Каталог «Газеты и журналы». Индекс 71141.
В Белоруссии Отделения связи. Каталог «Издания стран СНГ». Индекс 71141.
В редакции «ТКЭА» можно подписаться с любого номера.

Адрес редакции: Украина, 65044, г. Одесса, а/я 17.

E-mail: tkea@optima.com.ua, web-сайт: www.tkea.com.ua,
тел. +38 (048) 728-18-50, 728-11-89,
тел./факс 728-49-46.

Редакция: Е. А. Тихонова, А. А. Ефименко, Н. М. Колганова,
М. Г. Микулинская, М. С. Назарова.

Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корсунская.

Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.

Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.

Печ. л. 8,0+1,0. Уч.-изд. л. 11,0. Тираж 500 экз. Заказ № 86.

Издательство «Политехперіодика»
(65044, г. Одесса-44, а/я 17).

Отпечатано в типографии издательства «ART-V»
(65091, г. Одесса, ул. Комитетская, 24а).

**ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2009 № 2 (80)

Год издания 33-й

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К.т.н. В. М. Чмиль

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

К.т.н. Н. М. Вакив (г. Львов)
Д.т.н. В. Н. Годованюк (г. Черновцы)
К.т.н. А. А. Дашковский (г. Киев)
Н. В. Кончиц (г. Киев)
Д.т.н. В. П. Малахов (г. Одесса)
Д.ф.-м.н. В. Ф. Мачулин (г. Киев)
Д.т.н. М. К. Можар (г. Киев)
В. А. Проценко (г. Киев)
Е. А. Тихонова (г. Одесса)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д.т.н. А. А. Ащеулов (г. Черновцы)
Д.т.н. В. В. Баранов (г. Минск)
К.т.н. Э. Н. Глушченко,
зам. гл. редактора (г. Киев)
Д.т.н. В. В. Данилов (г. Донецк)
Д.т.н. В. Т. Дейнега (г. Одесса)
Д.ф.-м.н. В. А. Дроздов (г. Одесса)
К.т.н. И. Н. Еримичой,
зам. гл. редактора (г. Одесса)
К.т.н. А. А. Ефименко,
ответственный секретарь (г. Одесса)
Д.т.н. С. Ю. Лузин (г. С.-Петербург)
К.т.н. И. Л. Михеева (г. Киев)
К.т.н. Ю. Е. Николаенко (г. Киев)
Д.ф.-м.н. В. В. Новиков (г. Одесса)
К.ф.-м.н. А. В. Рыбка (г. Харьков)
К.т.н. В. В. Рюхтин (г. Черновцы)
Д.ф.-м.н. М. И. Самойлович (г. Москва)
Д.ф.-м.н. П. В. Серба (г. Таганрог)
Д.х.н. В. Н. Томашик (г. Киев)
Д.ф.-м.н. О. И. Шпотюк (г. Львов)

УЧРЕДИТЕЛИ

Министерство промышленной политики
Украины
Институт физики полупроводников
им. В. Е. Лашкарёва
Научно-производственное
предприятие «Сатурн»
Одесский национальный
политехнический университет
Издательство "Политехперіодика"

Одобрено к печати Ученым советом ОНПУ
(Протокол № 6 от 24.02 2009 г.)

Новые компоненты для электронной аппаратуры

Первичные источники тока $\text{Li/Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$. *Дудяк А. В., Заслонкин А. В., Ковалюк З. Д., Минтянский И. В., Савицкий П. И.* 3

Электронные средства: исследования, разработки

Свойства коммутационных ячеек, используемых в системах автоматизированного контроля. *Медведик А. Д.* 8

Физические основы проектирования зеркал оптических резонаторов полихромных лазеров. *Бондарчук Я. М., Петровская Г. А., Таттарин В. Я.* 11

Микропроцессорные устройства и системы

Микропроцессор звездообразной структуры. *Синегуб Н. И.* 14

Вопросы приборостроения

Аппаратура для мониторинга элементного состава полиметаллических руд РЛП-21. *Ефименко С. А.* 16

Сенсоэлектроника

Магнитокоммутируемая микросхема и датчик измерения скорости ветра на ее основе. *Касимов Ф. Д., Ибрагимов Р. А., Свихнушин Н. М.* 21

Функциональная микро- и нанoeлектроника

СБИС для микроэлектронного координатно-чувствительного детектора приборов элементного анализа материалов. *Сидоренко В. П., Вербицкий В. Г., Прокофьев Ю. В., Кизяк А. Ю., Николаенко Ю. Е.* 25

Анализ влияния способа соединения столбиковых выводов интегральных схем на их сопротивление. *Готра З. Ю., Дячок Д. Т.* 30

Обеспечение тепловых режимов

Система термоэлектрического кондиционирования воздуха на основе проникаемых термоэлементов. *Черкез Р. Г.* 34

Технологические процессы и оборудование

Электроосаждение конформных электродов для получения туннельного перехода с вакуумным нанозазором. *Джангидзе Л. Б., Тавхелидзе А. Н., Благодзе Ю. М., Талиашвили З. И.* 37

Бесконтактный метод определения эффективности термоэлектрических материалов. *Ащеулов А. А.* 43

Материалы электроники

Изменение свойств пленок кремнийорганических стекол после термической и плазмохимической обработок. *Иванчиков А. Э., Кисель А. М., Медведева А. Б., Плебанович В. И.* 46

Оценка параметров компонентов моноармированной стеклокерамики со стеклокристаллической матрицей. *Дмитриев М. В., Еримичой И. Н., Панов Л. И.* 51

Метрология. Стандартизация

Измеритель динамического диапазона радиочастотных усилителей. *Дрозд С. С., Мамедов К. Я., Ямпольский Ю. С.* 58

Библиография

Анотации к статьям номера
Новые книги 24, 29, 33, 42, 57, 60

В портфеле редакции 45

Выставки. Конференции 2-я, 4-я стр. обл.

ЗМІСТ

Нові компоненти для електронної апаратури

Первинні джерела струму $\text{Li/Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$. Дудяк О. В., Заслонкін А. В., Ковалюк З. Д., Мінтянський І. В., Савицький П. І. (3)

Електронні засоби: дослідження, розробки

Властивості комутаційних комірок, що застосовуються в системах автоматизованого контролю. Медведик А. Д. (8)
Фізичні основи проектування дзеркал оптичних резонаторів поліхромних лазерів. Бондарчук Я. М., Петровська Г. А., Татарин В. Я. (11)

Мікропроцесорні пристрої та системи

Мікропроцесор зіркоподібної структури. Синегуб М. І. (14)

Питання приладобудування

Апаратура для моніторингу елементного складу поліметалічних руд РЛП-21. Єфіменко С. А. (16)

Сенсоелектроніка

Магнітокомутуєма мікросхема та датчик вимірювання швидкості вітру на її основі. Касимов Ф. Д., Ібрагімов Р. А., Свіхнушин М. М. (21)

Функціональна мікро- та наноелектроніка

НВІС для мікроелектронного координатно-чутливого детектора приладів для елементного аналізу матеріалів. Сидоренко В. П., Вербицький В. Г., Прокоф'єв Ю. В., Кизяк А. Ю., Ніколаєнко Ю. Є. (25)

Аналіз впливу способу з'єднання стовпчикових виводів інтегральних схем на їх опір. Готра З. Ю., Дячок Д. Т. (30)

Забезпечення теплових режимів

Система термоелектричного кондиціонування повітря на основі проникних термоелементів. Черкез Р. Г. (34)

Технологічні процеси та обладнання

Електроосадження конформних електродів для отримання тунельного переходу з вакуумним нанозазором. Джангідзе Л. Б., Тавхелідзе А. Н., Благідзе Ю. М., Таліашвілі З. І. (37)

Безконтактний метод визначення ефективності термоелектричних матеріалів. Аїчеулов А. А. (43)

Матеріали електроніки

Зміна властивостей плівок кремнійорганічних стеклов після термічної та плазмохімічної обробки. Іванчикова О. Е., Кісель А. М., Медведєва Г. Б., Плебанович В. І. (46)

Оцінка параметрів компонентів моноармованої склокераміки із склокристалічною матрицею. Дмитрієв М. В., Єрмічова І. М., Панов Л. І. (51)

Метрологія. Стандартизація

Вимірювач динамічного діапазону радіочастотних підсилювачів. Дрозд С. С., Мамедов К. Я., Ямпольський Ю. С. (58)

CONTENT

New components for the electronic equipment

Primary power sources $\text{Li/Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$. Dudyak A. V., Zaslonskin A. V., Kovalyuk Z. D., Mintyansky I. V., Savicky P. I. (3)

Electronic means: investigations, development

Properties of commutation cells used in automatized control systems. Medvedik A. D. (8)

Designing of mirrors of optical resonators of multi-colour lasers. Bondarchuk J. M., Petrovska G. A., Tatarin V. J. (11)

Microprocessor devices and systems

The microprocessor of starshaped structure. Sinegub N. I. (14)

Questions of instrument making

The equipment for monitoring of chemical composition of complex ores RLP-21. Yefimenko S. A. (16)

Sensoelectronics

Magneto switch microcircuit and wind speed measurement's sensor on its base. Kasimov F. D., Ibragimov R. A., Svikhnu-shin N. M. (21)

Functional micro- and nanoelectronics

VLSI for microelectronic coordinate-sensitive detector of the devices for element analysis of substance. Sidorenko V. P., Verbitskiy V. G., Prokofiev Yu. V., Kyziak A. Yu., Nikolayenko Yu. E. (25)

The analysis of influence of integrated circuits rigid pin leads connection type on their resistance. Hotra Z. Y., Dyachok D. T. (30)

Ensuring of thermal modes

The system of thermoelectric air conditioning based on permeable thermoelements. Cherkez R. G. (34)

Technological processes and equipment

Electroplating of the conform electrodes for obtaining of a tunnel transition with a vacuum nano-clearance. Djanghidze L. B., Tavkhelidze A. N., Blughidze U. M., Taliashvili Z. I. (37)

Non-invasive method of determination of thermoelectric materials figure of merit. Ashcheulov A. A. (43)

Materials of electronics

Modification of spin-on-glass films properties during the thermal and plasma treatments. Ivanchykau A. E., Kisel A. M., Medvedeva A. B., Plebanovich V. I. (46)

Estimation of the components of monoreinforced glass-ceramics with glass-crystalline matrix. Dmitriev M. V., Yerimichoy I. N., Panov L. I. (51)

Metrology. Standartization

Dynamic range meter for radiofrequency amplifiers. Drozd S. S., Mamedov K. Y., Yampolsky Yu. S. (58)

А. В. ДУДЯК, А. В. ЗАСЛОНКИН, д. ф.-м. н. З. Д. КОВАЛЮК,
к. ф.-м. н. И. В. МИНТЯНСКИЙ, к. ф.-м. н. П. И. САВИЦКИЙ

Украина, г. Черновцы, ЧО Института проблем материаловедения
им. И. Н. Францевича
E-mail: chimsp@ukrpost.ua

Дата поступления в редакцию
18.02 2009 г.

Оппоненты: д. т. н. А. А. АЩЕУЛОВ
(Ин-т термоэлектричества, г. Черновцы),
д. х. н. Г. Я. КОЛБАСОВ
(ИОНХ им. В. И. Вернадского, г. Киев)

ПЕРВИЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА $\text{Li/Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$

Исследованы эксплуатационные характеристики электрохимической системы $\text{Li/Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$, определен механизм токообразования. Измерены импедансные спектры гальванической пары при различной глубине разрядки. Предложена модель эквивалентной электрической схемы.

В сравнении с традиционными электрохимическими системами, литиевые источники тока обладают большей удельной энергоемкостью и успешно используются в различных портативных электронных приборах. Но, несмотря на очевидные преимущества, литиевые системы имеют и значительный недостаток — низкие допустимые токи нагрузки. Поэтому возникает необходимость поиска новых высокопроводящих катодных материалов. Как отмечено в [1—4], перспективными активными веществами для таких элементов являются селенид висмута Bi_2Se_3 , медно-висмутовые халькогениды CuBiSe_2 и CuBiS_2 , которые обладают относительно высокими энергетическими характеристиками. В [5] показано, что эффективным веществом для электродов полуторавольтовых источников тока, которое обеспечивает относительно высокую мощность литиевых систем, является медно-висмутовый сульфид $\text{Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$.

Целью данной работы было исследование эксплуатационных характеристик гальванической пары $\text{Li/Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$, определение механизма токообразующей реакции, а также изучение электронных и ионных свойств системы с использованием методики электрохимической импедансной спектроскопии.

Объекты и методы исследований

Объектом исследований была гальваническая пара $\text{Li/Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$. Катодный материал получали путем двухэтапного синтеза, который проводили в запаянных кварцевых ампулах, вакуумированных до остаточного давления 10^{-5} мм рт. ст. Вначале сплавлялись стехиометрические количества металлических компонент (Bi и Cu) при температуре $1100 \pm 10^\circ\text{C}$ на протяжении 3—4 ч. Затем ампула вскрывалась, в нее добавлялось стехиометрическое количество серы и процесс вакуумирования-запайки повторялся. На заключительном этапе ампула постепенно ($10^\circ\text{C}/\text{ч}$) нагревалась до

температуры $800 \pm 10^\circ\text{C}$ и выдерживалась при ней не менее трех часов.

Эксперименты проводились на элементах стандартного типоразмера «2325» ($\varnothing 23$ мм, высота $h=2,5$ мм). Катоды были изготовлены по порошковой технологии. После механического дробления материал измельчался в шаровой мельнице «Санд» для получения мелкодисперсного порошка ($d \leq 75$ мкм). Дисковые электроды диаметром 19,5 мм и высотой $\sim 1,15$ мм формировались при комнатной температуре в специальной пресс-форме под давлением около 10^3 кг/см², при этом для механической прочности электродов использовали вяжущее вещество. Для повышения эффективности использования $\text{Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$ и протекания токообразующей реакции во всем объеме к катодной массе добавлялся порообразователь. После термообработки в динамическом вакууме при температуре 220°C в течение двух часов формировалась пористая структура электрода с относительным объемом пор, близким к 20%.

Для анода из полоски металлического лития толщиной 0,80 мм вырезались диски диаметром 18 мм, что обеспечивало энергоемкость отрицательного электрода примерно $415 \text{ мА} \cdot \text{ч}$.

В качестве электролита использовался одномолярный раствор тетрафторбората лития LiBF_4 в γ -бутиролактоне, а в качестве сепаратора — нетканый полипропилен.

Эксплуатационные характеристики системы определялись при комнатной температуре и разрядке постоянным током различной величины (0,1; 0,3; 1 и 2 мА) до конечного напряжения 1 В. Вольт-амперные характеристики снимались в гальванодинамическом режиме при скорости развертки 1 мкА/с. Дифрактограммы разряженного катодного материала получали в $\text{Cu-K}\alpha$ -излучении с помощью рентгеновского двухкристаллического дифрактометра ДРОН-УМ1. Диапазон углов дифрагированного отражения составлял $10^\circ < 2\theta < 60^\circ$ с шагом сканирования $0,05^\circ$ и экспозицией по 5 с в каждой точке.

Спектры электрохимического импеданса источника тока $\text{Li/Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$ исследовались при комнатной температуре в диапазоне частот 10^{-2} — 10^6 Гц на установке, включающей в себя высокочастотный анализатор спектров SI 1255 «HF Frequency response analyzer», совмещенный с аналогово-цифровым преобразователем SI 1286 «Electrochemical interface».

Амплитуда приложенного синусоидального напряжения была равна 5 мВ. Перед исследованиями зависимости импеданса от глубины разрядки гальванический элемент разряжали до заданного уровня и уравнивали систему в течение 24 часов. Импедансные спектры анализировались с помощью комплексной нелинейной программы ZSimpWin 3.21.

Результаты исследований

Разрядные параметры. Типичные разрядные кривые элементов $\text{Li/Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$ при различном разрядном токе приведены на **рис. 1**, а результаты для некоторых элементов обобщены в **табл. 1**. При токе 1 мА полученная энергоёмкость составляет 315 мА·ч, а ее максимальное значение (при 0,1 мА) — 380 мА·ч, т. е. при номинальном напряжении 1,5 В экспериментально получена энергия 570 мВт·ч. Соответствующая объемная энергия элемента равна 549 Вт·ч/дм³, а весовая (в пересчете на активный материал) — 552 Вт·ч/кг. Из ватт-амперной характеристики (**рис. 2**) следует, что максимальная мощность элемента составляет 14 мВт.

Эксплуатационные параметры источников тока (удельная емкость, энергия и мощность) зависят от их типоразмера, конструкции, технологии изготовления, режима разрядки и т. п., что, в свою очередь, определяется областью конкретного практического применения. Сравнение параметров исследуемых элементов и элементов Li/CuBiSe_2 , Li/CuBiSeS и $\text{Li/Bi}_2\text{Se}_3$ показывает, что источник тока $\text{Li/Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$ обладает

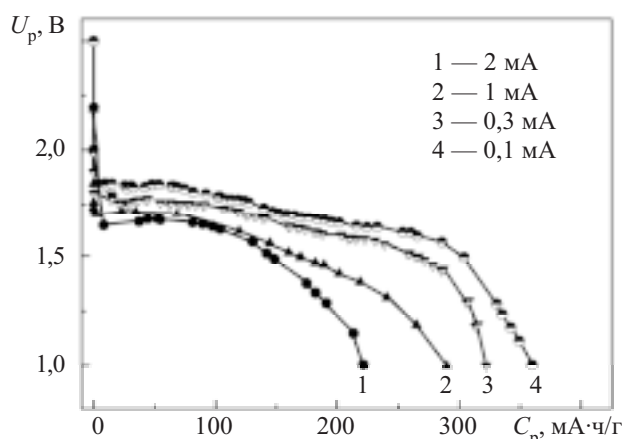


Рис. 1. Разрядные характеристики литиевого источника тока $\text{Li/Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$ при различных значениях тока

Таблица 1

Разрядные параметры элементов $\text{Li/Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$

№ п/п	Вес активного материала, г	Разрядный ток, мА	Энергоёмкость, мА·ч	Энергия, мВт·ч
1	1,032	2	228	343
2	1,032	1	307	446
3	1,032	1	315	454
4	1,032	0,3	330	534
5	1,032	0,1	380	570

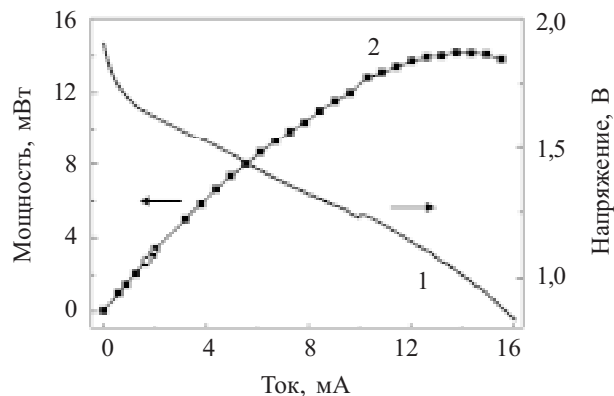


Рис. 2. Вольт-амперная (1) и ватт-амперная (2) характеристики источника тока $\text{Li/Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$

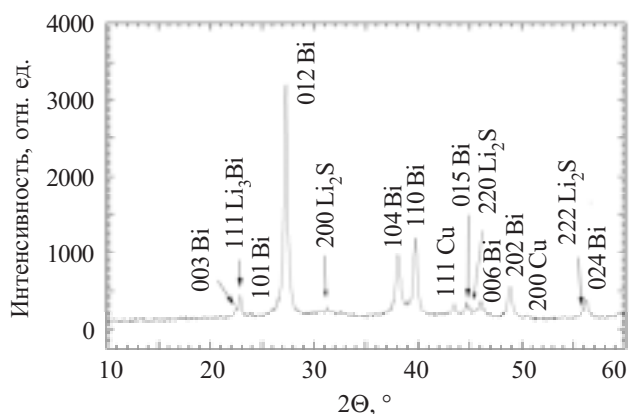
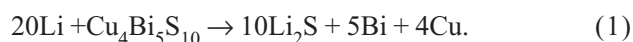


Рис. 3. Дифрактограмма катодного материала источника тока $\text{Li/Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$ после его полной разрядки

увеличенным на 25—35% значением разрядной емкости при токе разрядки 1 мА, а также большей удельной энергией.

Токообразующие процессы. Для определения их механизма в гальваническом элементе $\text{Li/Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$ проводились рентгенодифрактометрические исследования кристаллической структуры разряженного катодного материала (**рис. 3**). При сравнении спектров дифракционного отражения со справочными данными таблиц JCPDS [6] были определены следующие фазы: Bi, Cu, Li_2S и Li_3Bi .

Рентгенофазовый анализ конечных продуктов реакции позволил предположить такой механизм токообразующей реакции:



Теоретическая энергоёмкость элемента, рассчитанная по реакции (1), составила 342 мА·ч, что меньше экспериментальной величины. Идентификация соединения Li_3Bi в продуктах реакции дала возможность предположить, что образованный при реакции (1) свободный висмут вступает во взаимодействие с литием анода, что и обеспечивает дополнительную емкость:



Импеданс и его моделирование. Для определения электронных и ионных свойств системы $\text{Li/Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$

исследовались изменения импедансных спектров при изменении глубины разрядки. Известно, что разделить импеданс на анодную и катодную составляющие можно лишь при использовании дополнительного электрода сравнения. Однако ввести такой электрод было невозможно, т. к. типоразмер изучаемых элементов не отличался от промышленных аналогов, и поэтому измерения проводились по двухэлектродной схеме. При такой схеме экспериментальные зависимости отражают источник тока в целом, и определить катодную составляющую импеданса можно только в том случае, если полностью пренебречь вкладом анодной составляющей. Но в нашем случае, несмотря на сравнительно большую площадь анода, этого сделать нельзя, т. к. импеданс гладкого лития может превышать или быть на уровне импеданса пористого катода.

С другой стороны, для литиевых систем трехэлектродные измерения носят скорее фундаментальный общенаучный характер, поскольку неадекватно отражают процессы в реальном гальваническом элементе. В частности, для трехэлектродной ячейки несущественны такие важные явления в источнике тока, как загрязнение электролита из-за взаимодействия с изменяющимися компонентами катода, возрастающий с глубиной разрядки дефицит электролита и др.

Приведенные ниже экспериментальные спектры точно отображают импеданс дисковой литиевой батареи «2325». Для адекватной же оценки свойств отдельных электродов были дополнительно исследованы импедансные спектры в зависимости от времени выдержки после прекращения очередной стадии разрядки.

Кратко рассмотрим физико-химические процессы, которые протекают на катоде и аноде при разрядке системы $\text{Li/Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$. Литий в контакте с неводным электролитом создает пассивационную пленку. С учетом справочных данных о границе раздела «литий–электролит», может быть предложено несколько эквивалентных схем пленки [7–9], которые включают в себя один или два RC -элемента. При взаимодей-

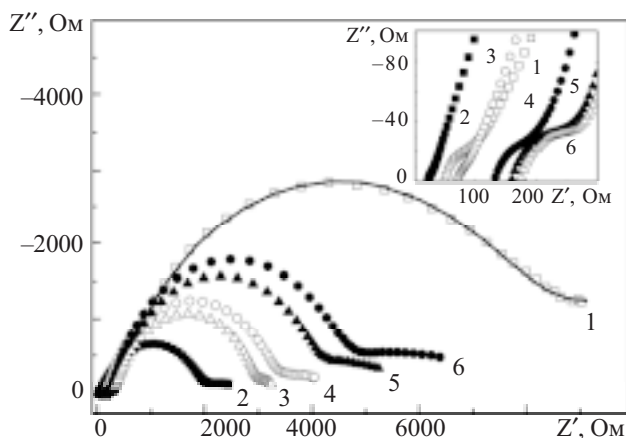


Рис. 4. Кривые Найквиста (импедансный спектр) для элемента $\text{Li/Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$ при различной глубине разрядки, мА·ч: 1 — 0,7; 2 — 90; 3 — 156; 4 — 202; 5 — 234; 6 — 305
Линия — рассчитанный спектр модели на рис. 5

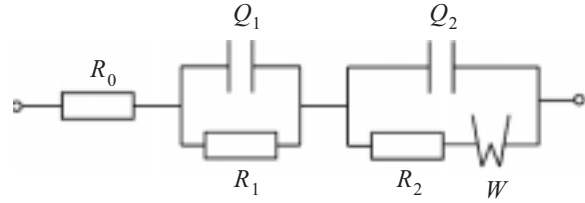


Рис. 5. Эквивалентная схема для моделирования импедансного спектра

ствии катодного материала с электролитом также происходит образование пленки, которая может быть представлена как RC -участок эквивалентной схемы. Проникая через пленку, ионы лития вступают во взаимодействие с катодом, которое может быть смоделировано работой $C(RW)$ -схемы.

На рис. 4 приведен импедансный спектр (кривые Найквиста) при различной глубине разрядки электрохимической системы. Все кривые представляют собой один или два деформированных полукруга. Диаметр высокочастотного полукруга и общий импеданс увеличиваются с ростом глубины разрядки. При этом не наблюдается прямолинейного диффузионного участка в области наименьших частот. Для моделирования импедансного спектра применялась эквивалентная схема, состоящая из последовательно соединенных звеньев, представленная на рис. 5. Здесь R_0 — омическая составляющая, которая содержит в себе сопротивления электролита, катода, анода и контактов. Вместо емкости C использован элемент с постоянной фазой Q , что позволило описать природу деформации «полукругов». Общее выражение для адмитанса (обратного импеданса) этого элемента имеет вид [10]

$$Y_Q = Y_0 \omega^n [\cos(\frac{n\pi}{2}) + j \sin(\frac{n\pi}{2})], \quad (3)$$

где Y_0 и n — параметры подгонки;
 ω — угловая частота переменного смещения $\omega = 2\pi f$;
 $j = \sqrt{-1}$.

В зависимости от n элемент Q воспроизводит различный отклик: при $n=1$ уравнение (3) отображает емкость, при $n=0$ — сопротивление величиной $R=Y_0^{-1}$, при $n=0,5$ — импеданс Варбурга.

Для моделирования диффузионного переноса частиц в схему включили элемент Варбурга W . В комплексной плоскости выражение для импеданса Варбурга имеет вид

$$Z_W = \sigma(1-j)\omega^{-1/2}, \quad (4)$$

где σ — коэффициент Варбурга.

В условиях наших экспериментов общее уравнение для определения коэффициентов диффузии D приводится к простой форме [10]

$$\sigma = RT / (k^2 F^2 A^2 D^{1/2} C), \quad (5)$$

где R — универсальная газовая постоянная;
 T — абсолютная температура;
 k — число перенесенных электронов;
 F — постоянная Фарадея;
 A — площадь электрода;

C — концентрация ионов лития (рассчитывалась из молярного объема $Cu_4Bi_5S_{10}$ и количества лития, вступившего в реакцию).

Несмотря на то, что при хранении источников тока оксидные пленки образуются на поверхности обоих электродов, пассивация лития намного существеннее из-за его очень высокой реакционной способности. Главным же обстоятельством, позволяющим рассматривать отдельно параметры положительного и отрицательного электродов, является то, что в процессе разрядки поверхность металлического анода все время стравливается-очищается. То есть каждая стадия релаксационного процесса фактически начинается с чистой литиевой поверхности, и поэтому при хранении наиболее существенно изменяется именно связанная с ним часть импедансных спектров.

При исследовании релаксационного процесса гальванического элемента $Li/Cu_4Bi_5S_{10}$ после выключения разряда наблюдалось увеличение диаметра большого «полукруга» на импедансном спектре (рис. 6). При этом кривые Найквиста хорошо моделируются схемой на рис. 5 (расчетные данные приведены в табл. 2). Анализируя результаты подгонки, видим, что со временем сопротивление R_1 увеличивается, а значение R_2 остается почти постоянным. Учитывая высокую активность металлического лития, можно утверждать, что цепь $(R_1 Q_1)$ моделирует пассивационную пленку на аноде.

Анализ изменения параметров эквивалентной схемы, которая моделирует импедансные спектры при раз-

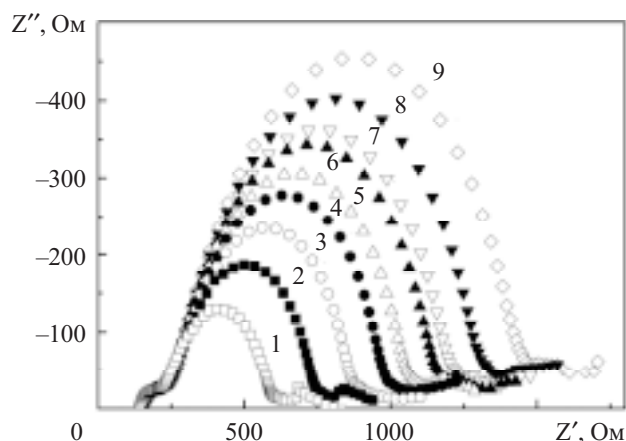


Рис. 6. Семейство кривых Найквиста (импедансный спектр) элемента $Li/Cu_4Bi_5S_{10}$ после разрядки на глубину 210 мА·ч для различного времени хранения (в часах): 1 — 0,3; 2 — 0,7; 3 — 1,1; 4 — 1,6; 5 — 2,1; 6 — 2,5; 7 — 3,0; 8 — 3,4; 9 — 3,9

личной глубине разрядки (табл. 3), показывает возрастание омического сопротивления в процессе разрядки (рис. 7). Как и ожидалось, величина коэффициента диффузии ионов лития значительно понижается при разрядке (от $1,40 \cdot 10^{-13}$ до $1,98 \cdot 10^{-18}$ см²/с).

При близких к единице значениях n элемент с постоянной фазой (Q) моделирует импедансное поведение искаженного емкостного элемента [11, с. 32]. Компьютерное моделирование для первого участка

Таблица 2

Изменение параметров эквивалентной схемы при релаксации

№ п/п	Время, ч	R_0 , Ом·см ²	Q_1		R_1 , Ом·см ²	Q_2		R_2 , Ом·см ²	W , с ^{1/2} ·Ом ⁻¹ ·см ⁻²
			Y_0^1 , с ^{n_1} ·Ом ⁻¹ ·см ⁻²	n_1		Y_0^2 , с ^{n_2} ·Ом ⁻¹ ·см ⁻²	n_2		
1	0,7	352	$7,47 \cdot 10^{-6}$	0,974	917	$2,58 \cdot 10^{-4}$	0,227	269	0,0084
2	1,1	448	$1,39 \cdot 10^{-5}$	0,753	1998	$1,07 \cdot 10^{-6}$	0,685	266	0,0124
3	1,6	451	$1,31 \cdot 10^{-5}$	0,764	2326	$1,32 \cdot 10^{-6}$	0,667	278	0,0103
4	2,1	454	$1,30 \cdot 10^{-5}$	0,764	2562	$1,37 \cdot 10^{-6}$	0,664	281	0,0106
5	2,5	454	$1,28 \cdot 10^{-5}$	0,767	2858	$1,55 \cdot 10^{-6}$	0,654	290	0,0095
6	3,0	454	$1,27 \cdot 10^{-5}$	0,769	3013	$1,62 \cdot 10^{-6}$	0,650	290	0,0086
7	3,4	457	$1,21 \cdot 10^{-5}$	0,777	3288	$1,94 \cdot 10^{-6}$	0,634	302	0,0082
8	3,9	460	$1,17 \cdot 10^{-5}$	0,782	3679	$2,20 \cdot 10^{-6}$	0,624	314	0,0086

Таблица 3

Изменение параметров эквивалентной схемы гальванического элемента с ростом глубины разрядки

№ п/п	Глубина разряда, мА·ч	R_0 , Ом·см ²	Q_1		R_1 , Ом·см ²	Q_2		R_2 , Ом·см ²	W , с ^{1/2} ·Ом ⁻¹ ·см ⁻²	D , см ² ·с ⁻¹
			Y_0^1 , с ^{n_1} ·Ом ⁻¹ ·см ⁻²	n_1		Y_0^2 , с ^{n_2} ·Ом ⁻¹ ·см ⁻²	n_2			
1	0,645	155	$1,77 \cdot 10^{-5}$	0,795	23031	$4,13 \cdot 10^{-5}$	0,0009	1383	0,0009	$1,40 \cdot 10^{-13}$
2	114	200	$5,73 \cdot 10^{-6}$	0,926	6910	$1,21 \cdot 10^{-4}$	0,0098	4995	0,0098	$5,33 \cdot 10^{-15}$
3	156	388	$7,00 \cdot 10^{-6}$	0,816	13971	$7,07 \cdot 10^{-6}$	0,0010	356	0,0010	$2,96 \cdot 10^{-17}$
4	193	463	$1,76 \cdot 10^{-5}$	0,815	12219	$5,49 \cdot 10^{-6}$	0,0017	454	0,0017	$5,59 \cdot 10^{-17}$
5	234	502	$1,04 \cdot 10^{-5}$	0,727	7946	$7,27 \cdot 10^{-8}$	0,0056	490	0,0056	$4,13 \cdot 10^{-16}$
6	305	543	$1,27 \cdot 10^{-5}$	0,763	7793	$5,59 \cdot 10^{-7}$	0,0016	693	0,0016	$1,98 \cdot 10^{-18}$

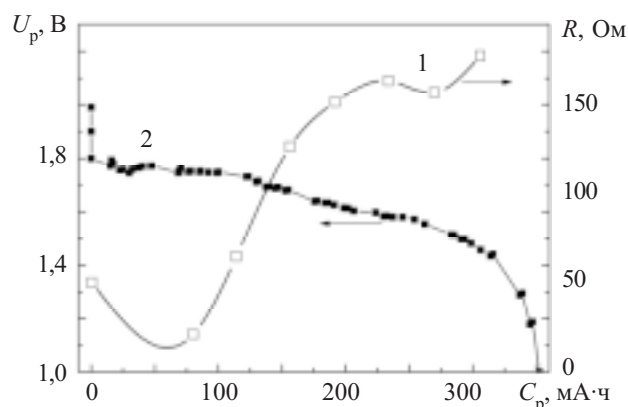


Рис. 7. Зависимость активного сопротивления (1) и напряжения (2) системы $\text{Li/Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$ от глубины разрядки при токе 0,3 мА

цепи (R_1Q_1) показало, что при любой глубине разрядки показатель степени n_1 почти не изменяется и имеет значения, близкие к единице ($n_1=0,727-0,993$). При этом величина Y_0^1 также претерпевает незначительные изменения. Известно, что элемент с постоянной фазой отражает структурные свойства электродов [11]. Значительные объемные изменения в катоде из материала $\text{Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$, которые возникают вследствие электрохимических реакций, должны были сильно изменить величины n_1 и Y_0^1 , однако этого не наблюдалось. Учитывая это, а также результаты исследования релаксационного процесса, можно с достаточной уверенностью допустить, что первый участок (R_1Q_1) не относится к катоду, а связан с импедансом пассивационной пленки на литиевом электроде.

Структура катодного материала вследствие токообразующей реакции разрушается и возникает дополнительная граница раздела между внешней и внутренней (сердцевинной) областями катодных частиц. При дальнейшей разрядке зона реакции движется от поверхности вглубь материала, толщина внешнего слоя увеличивается, катод все больше превращается в разупорядоченную матрицу, и новая граница раздела становится менее выраженной. Такие преобразования должны приводить и к изменению характера импедансного отклика с емкостного на резистивный. Это наблюдалось для второго участка цепи (R_2Q_2) и, следовательно, этот участок моделирует процессы, которые происходят на катоде.

Выводы

Проведенные исследования показали, что применение медно-висмутевого сульфида $\text{Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$ в качестве активного катодного вещества позволяет увеличить мощностные и емкостные характеристики полупровольниковых литиевых источников тока. В частности, разрядная энергоемкость «2325» элементов при токе 1 мА превышает 300 мА·ч.

Впервые изучены спектры импеданса и определены токообразующие реакции для системы $\text{Li/Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$. Методом компьютерного моделирования установлена эквивалентная схема, описывающая поведение импеданса, найдены параметры ее элементов при различной глубине разрядки.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Пат. 45130А України. Літєвий елемент / А. В. Заслонкін, З. Д. Ковалюк, І. В. Мінтянський та ін.— 2002.— Бюл. № 3.
2. Pat. 5368957 USA. Energy storage device / I. D. Kozmik, K. D. Tovstjuk, Z. D. Kovalyuk, et. al.— 06.01 1995.
3. Заслонкін А. В., Ковалюк З. Д., Мінтянський І. В., Савицький П. І. Катодні матеріали для літєвих джерел струму на основі шаруватого селеніду вісмуту // Науковий вісник ЧНУ.— 2000.— Вип. 86: Фізика. Електроніка.— Чернівці: ЧНУ.— С. 92—94.
4. Пат. 77971 України. Літєве джерело струму / А. В. Заслонкін, З. Д. Ковалюк, І. В. Мінтянський та ін.— 2005.— Бюл. № 11.
5. Пат. 79362 України. Півторавольтовий літєвий елемент / О. В. Дудяк, А. В. Заслонкін, З. Д. Ковалюк та ін.— 2006.— Бюл. № 2.
6. Inorganic Crystal Structure Database (ICSD).— Gmelin-Institut fur Anorganische Chemie and Fachinformations-zentrum FIZ Karlsruhe, 1995.
7. Narayanan S. R., Shen D. H., Surampudi S. et. al. Electrochemical impedance spectroscopy of lithium-titanium disulfide rechargeable cells // J. Electrochem. Soc.— 1993.— Vol. 140, N 7.— P. 1854—1861.
8. Desjardins C. D., MacLean G. K., Sharifian H. Electrochemical passivation of lithium in lithium hexafluoroarsenate/2-methyltetrahydrofuran electrolyte // J. Electrochem. Soc.— 1989. Vol. 136, N 2.— P. 345—349.
9. Takami N., Ohsaki T., Inada K. The impedance of lithium electrodes in LiPF_6 // J. Electrochem. Soc.— 1992.— Vol. 139, N 7.— P. 1849—1854.
10. Piao T., Park S.-M., Doh C.-H., Moon S.-I. Intercalation of lithium ions into graphite electrodes studied by AC impedance measurements // J. Electrochem. Soc.— 1999.— Vol. 146, N 8.— P. 2794—2798.
11. Стойнов З. Б., Графов Б. М., Савова-Стойнова Б. С., Елкін В. В. Электрохимический импеданс.— М.: Наука, 1991.

Дата поступления в редакцию
19.12 2008 г.

Оппоненты: д. т. н. Э. А. СУКАЧЕВ
(ОНАС им. А. С. Попова, г. Одесса);

д. т. н. В. М. ШОКАЛО
(ХНУРЭ, г. Харьков)

К. т. н. А. Д. МЕДВЕДИК

Украина, Одесский национальный политехнический университет

СВОЙСТВА КОММУТАЦИОННЫХ ЯЧЕЕК, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ

Рассмотрены основные свойства коммутационных ячеек с произвольным числом выводов, на основе которых строятся регулярные коммутационные структуры. Проведен сравнительный анализ известных коммутационных структур.

Одним из основных узлов систем автоматизированного контроля и диагностики РЭА является коммутатор сигналов, осуществляющий связь между источниками тестовых сигналов, объектом контроля и стандартными измерительными приборами.

Универсальность системы автоматизированного контроля (САК), возможность ее гибкой перестройки под различные объекты контроля в значительной степени определяется структурой коммутатора. Для обеспечения этих качеств коммутаторы в САК строятся по регулярному принципу на основе однородной структуры, состоящей из определенного количества взаимосвязанных коммутационных ячеек (КЯ) [1, 2]. Производительность такого коммутатора, т. е. количество всевозможных соединений при заданном числе независимых связей между источниками и приемниками сигналов, зависит от внутренней структуры отдельной коммутационной ячейки.

Способы построения коммутационных ячеек различной конфигурации освещены в ряде работ, например [2—4]. Однако предельные возможности КЯ с заданным числом выводов, т. е. число независимых связей и максимально возможное количество соединений при заданных связях, в литературе не рассматривались. Оценка предельных характеристик КЯ дает возможность провести сравнительный анализ известных структур, а также осуществить оптимальный выбор типа КЯ, исходя из конкретных задач построения САК.

В данной работе исследуются некоторые свойства двунаправленной гипотетической ячейки (ГКЯ) с произвольным числом внешних выводов Q , каждый из которых может выполнять функции либо входа, либо выхода. Внутренняя структура такой ячейки не определена, за исключением того, что число коммутируемых элементов (КЭ) в ячейке и способ их соединения обеспечивает все возможные соединения между выводами.

Прежде всего рассмотрим вопрос о максимально возможном количестве независимых связей M , которые могут быть организованы на КЯ с Q выводами. Под независимыми будем понимать такие две связи, у которых ни один элемент подмножества выводов одной связи не входит в подмножество выводов другой.

Число независимых связей максимально в том случае, когда каждая из связей включает в себя два вывода (см. рис. 1), т. е.

$$M_{\max} = \begin{cases} \frac{Q}{2}, & \text{если } Q \text{ четное } (Q > 2), \\ \frac{Q-1}{2}, & \text{если } Q \text{ нечетное } (Q > 2). \end{cases} \quad (1)$$

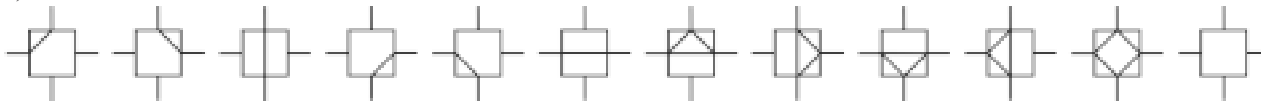
Если обозначить через L_i ($i=1, 2, \dots, M$) число выводов, входящих в i -ю связь, то максимально возможное число выводов в одной связи

$$L_{\max} = \begin{cases} Q-2(M-1), & \text{если } Q \text{ четное}, \\ Q-2(M-1)-1, & \text{если } Q \text{ нечетное}. \end{cases} \quad (2)$$

Определим число возможных соединений в ГКЯ с Q выводами при заданном количестве независимых связей M .

Предположим, что в i -ю связь входит L_i выводов, причем $2 \leq L_i \leq Q-2(M-1)$.

а) $M=1$



б) $M=2$

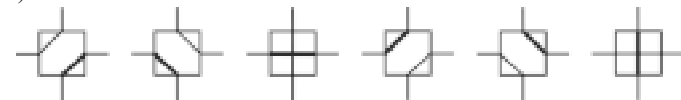


Рис. 1

Очевидно, что при организации одной независимой связи, включающей в себя L_1 выводов, число возможных соединений определяется числом сочетаний $C_Q^{L_1}$ из Q элементов по L_1 . Общее количество способов построения одной независимой связи с L_1 выводами ($2 \leq L_1 \leq Q$)

$$S_1(Q) = \sum_{L_1=2}^Q C_Q^{L_1} + 1, \quad (3)$$

причем $S_1(Q)=1$ соответствует полностью разомкнутому состоянию КЯ.

При организации двух независимых связей ($M=2$) одна из них содержит L_1 выводов, причем L_1 может изменяться от 2 до $Q/2$, а вторая может быть образована из оставшихся $Q-L_1$ выводов и изменяться в пределах $L_1 \leq L_2 \leq Q-L_1$.

В этом случае число различных способов построения двух независимых связей будет определяться выражением

$$S_2(Q) = \sum_{L_1=2}^{[Q/2]} \sum_{L_2=L_1}^{Q-L_1} C_Q^{L_1} C_{Q-L_1}^{L_2}, \quad (4)$$

где $[]$ — целая часть соотношения.

Проводя аналогичные рассуждения для других значений M , можем записать, что

$$S_{об}(Q) = \sum_{L_1=2}^{[Q/M]} \sum_{L_2=L_1}^{Q-L_1} \sum_{L_3=L_2}^{Q-L_1-L_2} \dots \sum_{L_M=L_{M-1}}^{Q-L_1-L_2-L_3-\dots-L_{M-1}} C_Q^{L_1} C_{Q-L_1}^{L_2} \dots C_{Q-L_1-L_2-\dots-L_{M-1}}^{L_M}. \quad (5)$$

И, наконец, общее число возможных соединений (включая повторяющиеся), которое может быть организовано на ГКЯ с Q выводами

$$S_{об}(Q) = \sum_{M=1}^{[Q/2]} \sum_{L_1=2}^{[Q/M]} \sum_{L_2=L_1}^{Q-L_1} \sum_{L_3=L_2}^{Q-L_1-L_2} \dots \sum_{L_M=L_{M-1}}^{Q-L_1-L_2-L_3-\dots-L_{M-1}} C_Q^{L_1} C_{Q-L_1}^{L_2} \dots C_{Q-L_1-L_2-\dots-L_{M-1}}^{L_M} + 1. \quad (6)$$

Так, например, для $Q=4$ общее число возможных соединений при $1 \leq M \leq 2$ равно 18 (рис. 1).

Из рис. 1, б следует, что для $M=2$ имеет место шесть комбинаций соединений, из которых только три соединения различны.

Для других значений Q повторяющиеся соединения будут иметь место в том случае, если две и более связи содержат одинаковое число выводов, т. е. $L_i=L_j$ ($i, j=1, 2, \dots, M$ и $i \neq j$), причем число повторяющихся соединений равно числу перестановок из количества связей с одинаковым числом выводов.

Таким образом, если число связей с одинаковым количеством выводов обозначить через $R(L_1, L_2, \dots, L_M)$, то общее число различных неповторяющихся соединений в ГКЯ с заданным Q может быть выражено следующей зависимостью:

$$S(Q) = \sum_{M=1}^{[Q/2]} \sum_{L_1=2}^{[Q/M]} \sum_{L_2=L_1}^{Q-L_1} \sum_{L_3=L_2}^{Q-L_1-L_2} \dots \sum_{L_M=L_{M-1}}^{Q-L_1-L_2-L_3-\dots-L_{M-1}} \frac{1}{P_{R(L_1, \dots, L_M)}} \times C_Q^{L_1} C_{Q-L_1}^{L_2} \dots C_{Q-L_1-L_2-\dots-L_{M-1}}^{L_M} + 1, \quad (7)$$

где $P_{R(L_1, \dots, L_M)}$ — число перестановок из R элементов, причем если $L_1 \neq L_2 \neq \dots \neq L_M$, то $R=1$ и, соответственно, $P_R=1$.

Так, например, для $Q=4$ имеет место только 15 различных (неповторяющихся) соединений, включая полностью разомкнутое состояние.

Определим минимально необходимое число коммутируемых элементов в коммутационной ячейке с Q выводами, при котором обеспечиваются все возможные неповторяющиеся соединения, определяемые выражением (7).

Предположим, что в КЯ с Q выводами требуется соединить 1-й вывод с каждым из остальных $Q-1$ выводов (рис. 2). Очевидно, что для этого требуется $Q-1$ коммутируемых элементов. Для соединения второго вывода с каждым из оставшихся $Q-2$ выводов потребуется еще $Q-2$ КЭ, для соединения третьего вывода с каждым из оставшихся — $Q-3$ КЭ и т. д.

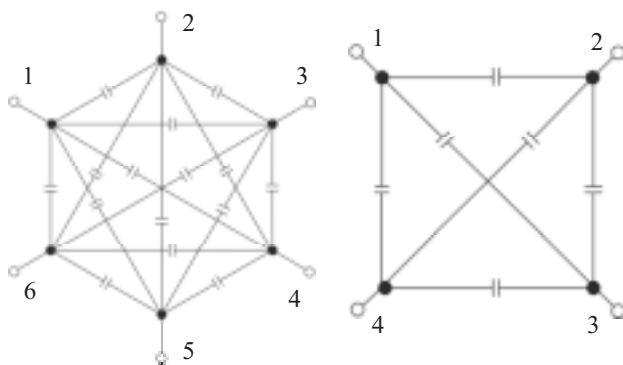


Рис. 2

В общем случае для организации всевозможных соединений по два элемента требуется

$$N = \sum_{i=1}^{Q-1} (Q-i) = C_Q^2 \quad (8)$$

коммутируемых элементов.

Число КЭ, определяемое формулой (8), является достаточным для получения всех возможных соединений, состоящих из более чем двух выводов. Из (8) также следует, что коммутируемые элементы в КЯ должны быть включены таким образом, чтобы связь между любой парой внешних выводов могла быть осуществлена только через один КЭ.

Перейдем к анализу известных структур коммутационных ячеек.

На рис. 3 приведены схемы четырех видов коммутационных ячеек с одинаковым числом внешних выводов ($Q=4$): а — КЯ, реализованная на шести коммутируемых элементах на «замыкание» в соответствии с (8); б — КЯ Березовского [3], в которой использованы четыре элемента на переброс и два на замыкание; в — «звездочная» структура КЯ, которая была применена автором в системе автоматизированного контроля РЭА; г — матричная структура КЯ.

Параметры приведенных схем приведены в табл. 1 и 2.

Анализ приведенных в таблицах параметров показал следующее.

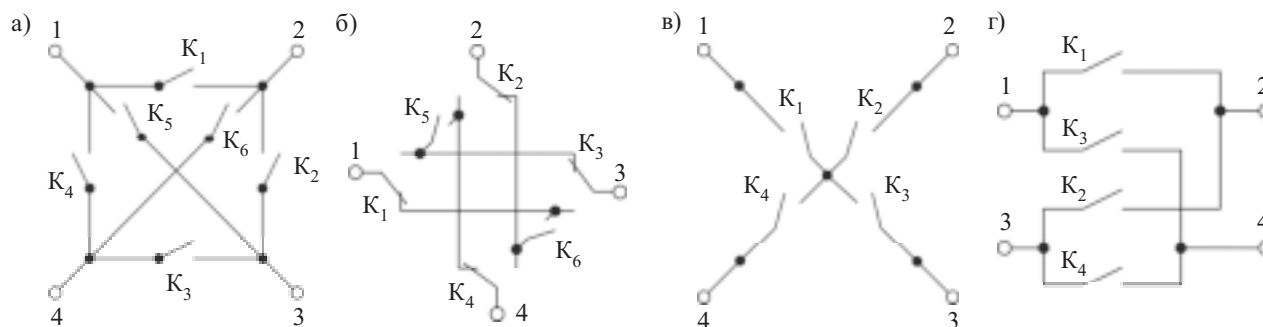


Рис. 3

Таблица 1

Номера соединяемых выводов	Число однотипных соединений			
	КЯ с коммутируемым элементом на замыкание	КЯ Березовского	КЯ с матричной структурой	КЯ со звездочной структурой
1, 2	1	2	1	1
1, 3	1	8	—	1
1, 4	1	2	1	1
2, 3	1	2	1	1
2, 4	1	8	—	1
3, 4	1	2	1	1
1, 2, 3	4	4	1	1
1, 2, 4	4	4	1	1
1, 3, 4	4	4	1	1
2, 3, 4	4	4	1	1
1, 2, 3, 4	38	4	5	1
1, 2—3, 4	1	2	1	—
1, 3—2, 4	1	12	—	—
1, 4—2, 3	1	2	1	—
0	1	4	1	5

Таблица 2

Параметр	КЯ с коммутируемым элементом на замыкание	КЯ Березовского	КЯ с матричной структурой	КЯ со звездочной структурой
Общее число соединений	64	64	16	16
Число неповторяющихся соединений	15	15	12	12
Максимальное число независимых связей	2	2	2	1
Число КЭ в КЯ	6	6	4	4

Общее число соединений (включая повторяющиеся) определяется различными состояниями N коммутируемых элементов, т. е. $S_{об}(Q)=2^N$.

Первые два вида рассмотренных КЯ удовлетворяют условиям полноты соединений, причем в КЯ Березовского имеет место более равномерное распределение повторяющихся соединений, что повышает «живучесть» КЯ. Это обусловлено тем, что в КЯ Березовского использованы коммутируемые элементы на перебор.

Коммутационные ячейки с матричной и звездочной структурами не удовлетворяют условиям полноты соединений, т. к. в одном и другом случаях некоторые соединения вообще отсутствуют, а в КЯ со звездочной структурой можно образовать только одну независимую связь. Очевидно, что невыполнение условий полноты соединений здесь обусловлено тем, что число коммутируемых элементов не удовлетворяет условию достаточности их количества (8).

Таким образом, в коммутаторах, построенных на основе регулярных структур, целесообразно использовать коммутационные ячейки с КЭ на замыкание или с КЭ Березовского, обеспечивающие большую гибкость и универсальность связей с системой автоматизированного контроля.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Проектирование внешних средств автоматизированного контроля радиоэлектронного оборудования / Под ред. Н. Н. Пономарева.— М.: Радио и связь, 1984.
2. Каляев А. В. Однородные коммутационные регистровые структуры.— М.: Сов. радио, 1978.
3. А. с. 1665367 СССР. Коммутационный элемент Березовского / С. А. Березовский.— 1989.— Бюл. № 9.
4. Никитюк Л. А. Архитектура инфокоммуникационной сети // Зв'язок.— 2007.— № 5.— С. 7—13.

К. т. н. Я. М. БОНДАРЧУК, Г. А. ПЕТРОВСКАЯ,
к. т. н. В. Я. ТАТАРИН

Украина, г. Львов, Научно-промышленная фирма «Протон»;
Национальный университет «Львовская политехника»
E-mail: bond@proton.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
17.02 2009 г.

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

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗЕРКАЛ ОПТИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ ПОЛИХРОМНЫХ ЛАЗЕРОВ

Рассматривается физическая модель резонаторных зеркал с графическим и математическим аппаратом обоснования процесса их проектирования с учетом поглощения в тонкопленочных покрытиях. Обеспечиваются оптимальные параметры зеркал для каждой длины волны генерации.

Развитие современных лазерных технологий, лазерной медицины, экологического мониторинга, систем навигации и т. п. связано с созданием мощных лазеров с широкими спектрами излучения. Газоразрядные лазеры с активными средами Ar^+ , Kr^+ , He-Ne^+ работают, преимущественно, в видимой и прилегающих к ней областях спектра. Значительный уровень мощности таких лазеров за счет полихромности удачно сочетается с присущей для газовых лазеров высокой пространственной однородностью выходного излучения. Многолинейный режим генерации достигается в случае применения широкополосных интерференционных зеркал с максимумом отражения на длине волны λ_0 , которая соответствует середине спектрального диапазона полихромного излучения. При проектировании резонаторных интерференционных зеркал преимущественно используют численные методы [1], в качестве контролируемых параметров синтезированных покрытий используют коэффициенты пропускания (или отражения) на длинах волны линий генерации. Получение максимальной интегральной мощности в таких лазерах возможно лишь при условии обеспечения оптимальных режимов генерации для каждого лазерного перехода. В то же время известно, что для каждой длины волны существует свой коэффициент оптимального пропускания выходного зеркала τ_i . Использование же широкополосных интерференционных зеркал с максимумом отражения в середине спектрального диапазона полихромного излучения не обеспечивает оптимального пропускания для всех длин волн. Кроме того, для многолинейных лазеров необходимо учитывать также диапазонные свойства интерференционных зеркал с точки зрения суммарного поглощения в структуре покрытия, которое имеет минимальное значение на резонансной длине волны λ_0 , а при отклонении от нее на 20–25% возрастает в десятки раз (рис. 1).

Игнорирование специфического характера спектральной зависимости коэффициента поглощения ре-

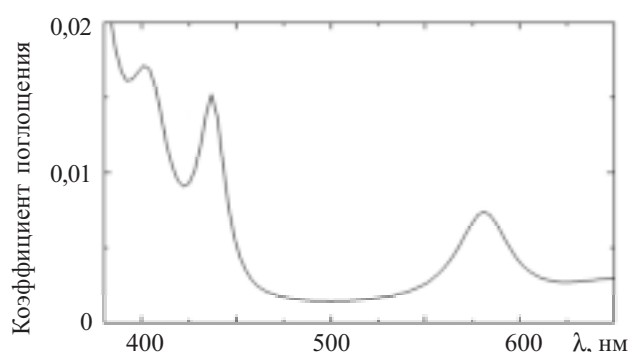


Рис. 1. Спектральная зависимость коэффициента поглощения пятнадцатислойного интерференционного покрытия $\text{ZrO}_2\text{-SiO}_2$ ($\lambda_0=500$ нм)

альных интерференционных зеркал в области высокого отражения приводит к существенному снижению интегральной мощности маломощных лазеров и возникновению внутрирезонаторных термических эффектов в мощных лазерах [2].

Таким образом, поиск новых подходов при проектировании резонаторных зеркал лазеров с широким спектром излучения с учетом диапазонных свойств интерференционных структур является весьма актуальным. Так как эффект поглощения в покрытиях зеркал по-разному влияет на характеристики выходного излучения в маломощных и мощных лазерах, то каждый из случаев рассмотрим отдельно.

Зеркала маломощных лазеров

Известно, что максимальная мощность в полихромных лазерах, в которых усиление незначительно превышает внутрирезонаторные потери, достигается при строгом соблюдении максимального отражения от «глухого» и оптимального пропускания «выходного» зеркала для каждой длины волны интегральной генерации. Значение коэффициента оптимального пропускания выходного зеркала зависит не только от коэффициента усиления, но и от общих потерь в резонаторе для данной длины волны. Существенную часть этих потерь составляет поглощение в покрытиях зеркал, величина которого зависит от структуры покрытия и длины волны генерации. В связи с этим при проектировании интерференционных зеркал необходимо обеспечить оптимальное пропускание и минимальное поглощение для каждой длины волны. Исходя из этого, можно обеспечить получение мак-

симальной интегральной мощности маломощных лазеров, если конструктивные параметры зеркал будут соответствовать минимуму целевой функции следующего вида:

для выходного зеркала

$$M = \sum_{i=1}^N \left(\sqrt{2G_{0i}} - a_i - \tau_i - \sigma \right)^2, \quad (1)$$

для глухого зеркала

$$M = \sum_{i=1}^N (a_i + \sigma)^2, \quad (2)$$

где G_{0i} — ненасыщенный коэффициент усиления i -го лазерного перехода;

a_i и τ_i — соответственно коэффициенты поглощения и пропускания зеркала для i -го перехода;

σ — слабодисперсионная составляющая внутрирезонаторных потерь (рассеяние лазерного излучения);

N — количество лазерных переходов.

Характерными представителями маломощных полухромных лазеров являются малогабаритные Ag^+ -лазеры с воздушным охлаждением. Длина разрядного промежутка в них не превышает 150 мм (диаметр разрядного канала $d \leq 1$ мм), ток разряда — до 10 А. В моделях таких лазеров реализуются четыре линии генерации излучения видимого диапазона с длиной волны $\lambda_1=476,5$ нм; $\lambda_2=488$ нм; $\lambda_3=496,5$ нм; $\lambda_4=514,5$ нм. Константы, которые определяют величины G_{0i} для лазерных переходов ионизированного аргона, исследованы и определены с достаточной точностью [3]. Коэффициенты оптимального пропускания выходного зеркала для данных длин волн были определены экспериментально методом калиброванных потерь и соответствуют значениям $\tau_1=0,5\text{—}3\%$, $\tau_2=2\text{—}4\%$, $\tau_3=0,5\text{—}1,5\%$, $\tau_4=1\text{—}2\%$. При разработке алгоритма численного проектирования зеркал мы исходили из условий их технологичности, и поэтому в качестве проектных параметров были использованы оптические толщины слоев. Пленкообразующие материалы слоев при этом выбирались из перечня используемых в серийном производстве ZnS , MgF_2 , Na_3AlF_6 , ZrO_2 , HfO_2 , SiO_2 . Программа синтеза была реализована на базе программного продукта Visual Micro Films. Значение σ для данного диапазона излучения принималось равным 0,2%. Проектирование интерференционных покрытий проводилось путем подбора толщины каждого слоя покрытия, при этом учитывались дисперсии показателей преломления n и поглощения k тонкопленочных материалов [4]

$$n^2(\lambda) = a + k^2(\lambda) + \frac{b\lambda^2(\lambda^2 - c^2)}{(\lambda^2 - c^2) + d^2\lambda^2}, \quad (3)$$

$$k(\lambda) = \frac{1}{2n(\lambda)} \frac{bd\lambda^3}{(\lambda^2 - c^2) + d^2\lambda^2}, \quad (4)$$

где a , b , c и d — оптические константы, зависящие от структуры материала. Их значения для выбранных материалов определены экспериментально в [4].

На рис. 2 представлены зависимости показателя преломления (1) и показателя поглощения (2) мате-

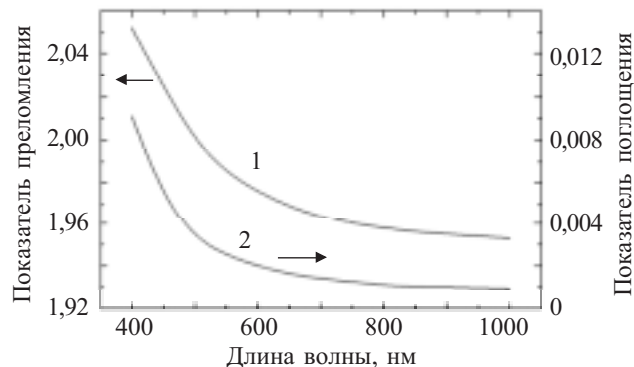


Рис. 2. Дисперсионные зависимости тонкопленочного материала ZrO_2

Таблица 1

Структуры синтезированных покрытий

Тип зеркала	Тонкопленочная структура	Материал В	Материал Н
Выходное	$S_0(0,7B; 1,3H)^7 0,7B$	ZrO_2	SiO_2
Глухое	$S_0(0,7B; 1,3H)^{13} 0,7B$	ZrO_2	SiO_2
Выходное	$S_0(0,7B; 1,3H)^7 0,7B$	HfO_2	SiO_2
Глухое	$S_0(0,7B; 1,3H)^{13} 0,7B$	HfO_2	SiO_2

риала ZrO_2 . Результаты синтеза показали, что минимальных значений целевых функций (1) и (2) удастся достичь для пар материалов $\text{ZrO}_2\text{—SiO}_2$ и $\text{HfO}_2\text{—SiO}_2$. В табл. 1 приведены структуры оптимальных синтезированных покрытий «глухого» и «выходного» зеркал для резонансной длины волны $\lambda_0=510$ нм.

На рис. 3 представлены спектральные характеристики пропускания и поглощения синтезированного выходного зеркала $S_0(0,7B; 1,3H)^7 0,7B$. Зеркала изготовлены по электронно-лучевой вакуумной технологии [5].

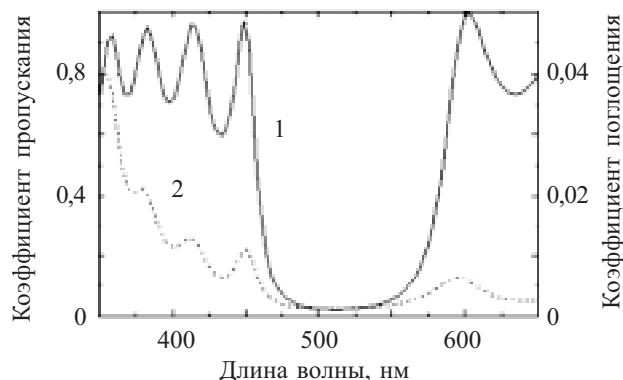


Рис. 3. Спектральные характеристики пропускания (1) и поглощения (2) синтезированного выходного зеркала $S_0(0,7B; 1,3H)^7 0,7B$

Результаты испытаний зеркал в открытых резонаторах были усреднены по трем парам каждого из типов зеркал не менее чем на трех активных элементах и приведены в табл. 2.

Результаты испытаний показали увеличение интегральной мощности излучения при использовании синтезированных зеркал в среднем на 50%, что свидетельствует о правильности и эффективности выбран-

Таблица 2

Результаты испытаний синтезированных зеркал

Тип активного элемента	Длина разрядного промежутка, мм	Диаметр разрядного канала, мм	Ток разряда, А	Паспортное значение интегральной мощности, мВт	Достигнутое значение интегральной мощности, мВт
Модель 001 («Мицелла»)	150±1	1 ^{-0,1}	10	50	75
Модель 002 («Магнум»)	100±1	1 ^{-0,1}	8	25	38

ного пути улучшения основных характеристик выходного излучения маломощных полихромных аргонных лазеров.

Зеркала мощных лазеров

Если в маломощных полихромных лазерах поглощение в зеркалах является определяющим с точки зрения получения максимальной выходной мощности излучения, то в мощных лазерах, в которых усиление значительно превышает потери, поглощением в зеркалах определяются термооптические внутрирезонаторные процессы [2]. Единственным эффективным способом минимизации тепловых потерь до недавнего времени было использование в лазерном производстве в качестве материала подложек зеркал кварцевого оптического стекла. Низкое значение ТКЛР стекол марок КУ-1,2 и КВ обуславливает минимальные термодформации рабочих поверхностей зеркал. Однако создание термосогласованных долговечных вакуумноплотных узлов элементов конструкции мощных газовых лазеров на основе кварцевой оптики и сегодня остается достаточно сложным. Хорошим решением проблемы является использование подложек зеркал из оптического бесцветного стекла и минимизации при этом поглощенной мощности в зеркальных покрытиях. Исходя из этого, тонкопленочная структура, на наш взгляд, должна определяться минимумом оценочного функционала

$$M = \sum_{i=1}^N b_i \left(\frac{G_{0i}}{\tau_i + a_i} - 1 \right) a_i, \quad (5)$$

где b_i — параметр насыщения для i -го лазерного перехода.

При минимальном значении функционала (5) обеспечивается минимальное термическое влияние внутрирезонаторного излучения на характеристики резонатора.

Исходя из констант, которые определяют особенности переходных процессов в моделях лазеров типа ЛГН-402, 404, 406, 502, были синтезированы интерференционные структуры резонаторных зеркал. При проектировании для основных лазерных переходов Ar^+ значения τ_i были определены экспериментально: для 476,5 нм — 2—6%, для 488,0 нм — 4—8%, для 496,5 нм — 2—4%, для 514,5 нм — 2—4%. В качестве проектных параметров в данном случае выбраны оптические толщины слоев интерференционных покрытий. Результаты синтеза для резонансной длины волны $\lambda_0=510$ нм приведены в табл. 3.

Зеркала с тонкопленочными структурами, приведенными в табл. 3, как и зеркала маломощных ла-

Таблица 3

Сруктуры синтезированных покрытий

Тип зеркала	Тонкопленочная структура	Материал В	Материал Н
Выходное	$S_0(0,7B; 1,3H)^{0,7B}$	ZrO ₂	SiO ₂
Глухое	$S_0(0,7B; 1,3H)^{11,0,7B}$	ZrO ₂	SiO ₂
Выходное	$S_0(0,8B; 1,2H)^{0,8B}$	HfO ₂	SiO ₂
Глухое	$S_0(0,8B; 1,2H)^{11,0,8B}$	HfO ₂	SiO ₂

ров, изготавливались по вакуумной технологии электронно-лучевого осаждения тонких пленок. Распыление материалов ZrO₂, HfO₂, SiO₂ проводилось на установке ВУ-2М. Особенности технологические режимы осаждения и последующая обработка зеркал, отличные от типового технологического процесса, в данном случае не использовались. С полученными зеркалами оптических резонаторов были изготовлены активные элементы ионных лазеров типа ГЛ-303. Стендовые испытания лазеров с данными активными элементами показали полное соответствие пространственных и временных характеристик выходного излучения техническим условиям при увеличении выходной мощности излучения в среднем на 20%.

Таким образом, предложенный способ проектирования зеркал полихромных лазеров позволяет существенно увеличить интегральную мощность излучения, а также уменьшить тепловые потери в резонаторах мощных лазеров. Разработка таких зеркал положила начало серии работ по созданию активных элементов с бесклеевыми вакуумноплотными соединениями, что позволит проводить термостабилизацию активных элементов на стадии вакуумирования, а это, в свою очередь, обеспечит достижение абсолютно других, более высоких параметров надежности полихромных газоразрядных лазеров.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Бондарчук Я. М., Довгий Я. О. Теоретичні й технологічні аспекти синтезу лазерних дзеркал// Фізика і хімія твердого тіла.— 2002.— Т. 3, № 2.— С. 199—214.
- Бондарчук Я. М., Петровська Г. А. Проектування оптичних резонаторів потужних неперервних лазерів// Вісник НУ «Львівська політехніка», серія Електроніка.— 2002.— № 455.— С. 60—64.
- Справочник по лазерам. Т. 1 / Под ред. А. М. Прохорова.— М.: Сов. радио, 1981.
- Петровська Г. А., Редько Т. А. Метод оптимізації дисперсійних характеристик тонкоплівкових оптичних матеріалів// Вісник НУ «Львівська політехніка», серія Електроніка.— 2002.— № 455.— С. 39—44.
- Бондарчук Я. М. Технологія і обробка оптичних матеріалів.— Львів: Ліга-Прес, 2001.

К. т. н. Н. И. СИНЕГУБ

Украина, Одесский национальный политехнический университет

Дата поступления в редакцию
19.11 2008 г.Оппонент д. т. н. В. С. СИТНИКОВ
(ОНПУ, г. Одесса)

МИКРОПРОЦЕССОР ЗВЕЗДООБРАЗНОЙ СТРУКТУРЫ

Предложенная структура позволяет повысить быстродействие микропроцессора путем увеличения выполняемых им команд без соответствующего увеличения VLIW-команд.

За последнее время характеристики микропроцессоров (МП), разработанных на основе различных архитектурно-структурных решений [1], значительно улучшились. Так, тактовая частота МП превысила 2 ГГц, а пиковая производительность — 7 млрд операций в секунду. И это не предел.

За более чем четвертьвековую историю микропроцессоры прошли большой путь развития [2, 3] — от однокристальных микропроцессоров с фиксированной системой команд до однокристальных микроЭВМ. При этом для повышения быстродействия МП используются следующие основные технические решения: предсказания переходов, выполнение микропрограмм с изменением порядка следования команд, условное (предикативное) исполнение команд и др. Но несмотря на достигнутые успехи, задача повышения быстродействия МП остается актуальной.

Одним из путей решения данной задачи является разработка архитектур процессоров с повышенным параллелизмом уровня команд. Такой архитектурой обладают VLIW-процессоры (VLIW — very long instruction word) [1], в командном слове которых задается некоторая совокупность параллельно выполняемых команд. Например, ядро микропроцессора

TriMedia компании Philips способно обрабатывать 5 команд за один такт (рис. 1). Другие модули этого микропроцессора, взаимодействуя с VLIW-ядром, выполняют обработку, специфичную для конкретного типа данных.

Характерной особенностью VLIW-процессоров является однозначное соответствие количества выполняемых МП-команд числу команд, задаваемых командным словом, т. е. для увеличения количества выполняемых МП-команд необходимо увеличивать длину VLIW-команд ядра микропроцессора. Так, например, у микропроцессора TM8000 Astra компании Transmeta длина VLIW-команд ядра увеличена со 128 до 256 разрядов, что позволяет обрабатывать за такт 8 команд длиной в 32 бита. Однако такое архитектурное решение ограничивает применение в микропроцессорах арифметических устройств (АУ), не требующих команд для задания режимов работы.

Другим частным случаем архитектур процессоров с повышенным параллелизмом уровня команд являются суперскалярные микропроцессоры, система команд которых не содержит никакого указания на параллельную обработку внутри процессора. Здесь параллелизм обеспечивается аппаратным способом.

В настоящей работе предложена оригинальная структура микропроцессора с высоким внутренним параллелизмом, обеспечивающим повышение быстродействия благодаря получению в одном такте нескольких скалярных результатов, причем количество выполняемых МП-команд может превышать число команд, задаваемых командным словом (рис. 2). Данный микропроцессор включает арифметические устройства, выполняющие одну либо несколько операций [4]. Различные АУ встраиваются в МП по мере необходимости, и количество АУ ограничивается лишь нагрузочной способностью элементов используемой элементной базы. Через шины данных АУ связаны с регистрами (Рг) данных, в которые по фронту синхроимпульса заносится информация. С помощью коммутаторов с тремя состояниями на выходе шины данных подключаются к кольцевым шинам [1]. МП также содержит память, кэш-память, устройство управления (УУ) и др. На регистры ядра данного МП по соответствующим шинам данных поступают операнды $A, B, C, D, \dots$, а также управляющие сигналы, задающие режимы работы арифметических устройств. Сформированные на выходах АУ резуль-

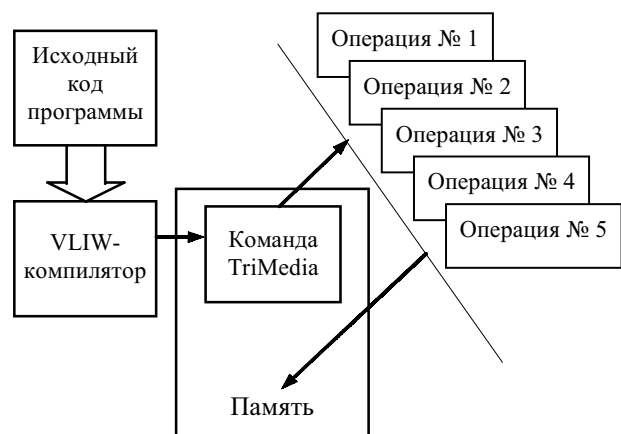


Рис. 1. Выполнение команд микропроцессором TriMedia

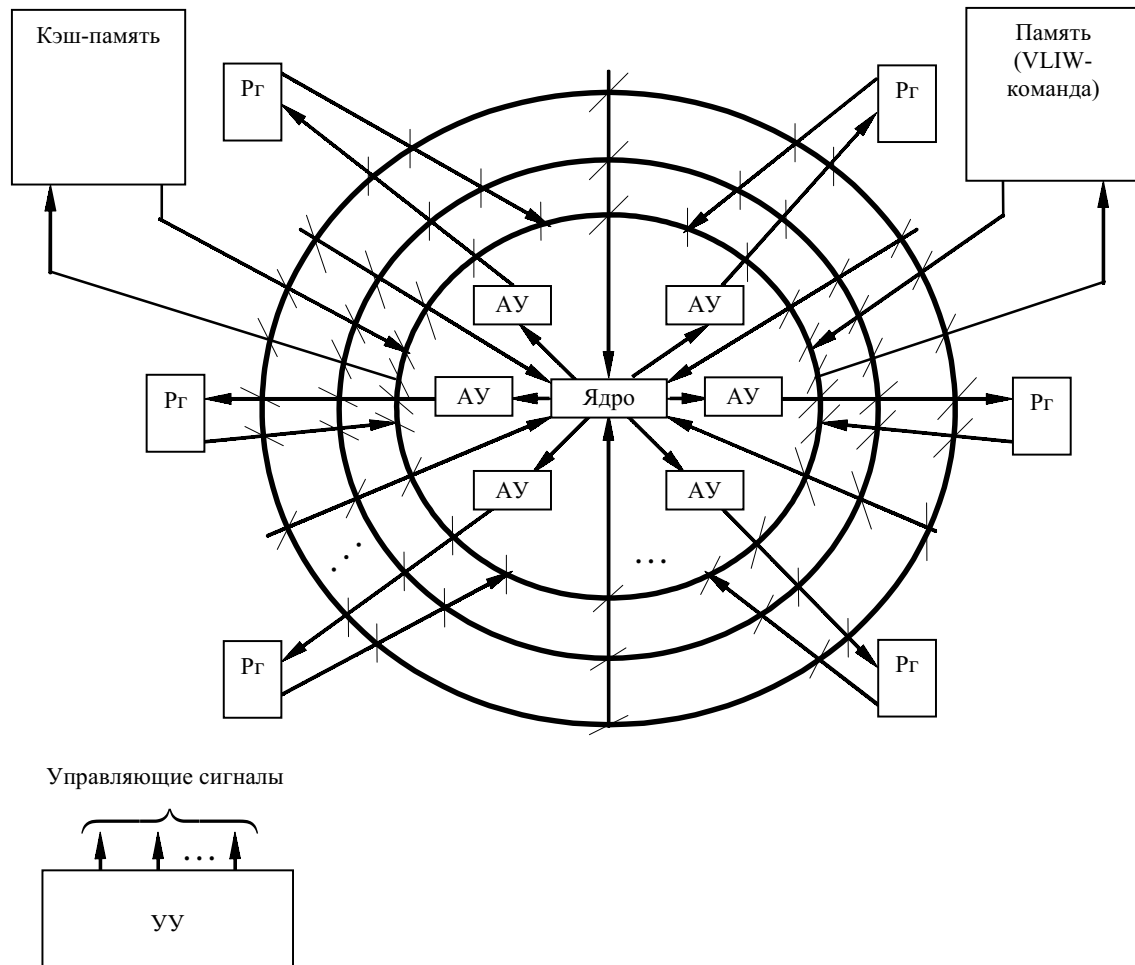


Рис. 2. Микропроцессор звездообразной структуры

таты обработки данных заносятся в регистры данных (кэш-память, память, др.). Далее, в соответствии с управляющей командой, информация из любого Рг (кэш-памяти, памяти и др.) может быть либо записана в любой регистр ядра и обработана арифметическими устройствами, либо выведена на внешнее устройство МП.

Режимы работы АУ могут задаваться следующим образом. Пусть, например, АУ₁ выполняет операцию $(\pm A) \cdot (\pm B) \pm C$. Если с помощью управляющих сигналов задать $A=+1$, то в АУ₁ сформируется операция $\pm B \pm C$. Если задать $C=0$, то сформируется операция $(\pm A) \cdot (\pm B)$ и т. д. Аналогично могут задаваться режимы работы и другим АУ. Возможна также иная организация работы предлагаемого МП.

Таким образом, в МП звездообразной структуры объединены архитектуры суперскалярного микропроцессора и VLIW-процессора, что позволяет повысить быстродействие путем увеличения количества парал-

лельно выполняемых МП команд без соответствующего увеличения длины VLIW-команд микропроцессора. Это достигается за счет использования присущего предлагаемой структуре внутреннего параллелизма, когда в МП применяются не только управляемые АУ, но и АУ, не требующие команд для задания режимов работы.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Корнеев В. В., Киселев А. В. Современные микропроцессоры.— СПб.: БХВ-Петербург, 2003.
2. Костров Б. В., Ручкин В. Н. Архитектура микропроцессорных систем.— М.: Диалог-МИФИ, 2007.
3. Бойко В. И., Гуржий А. Н., Жуйков В. Я. и др. Схемотехника электронных схем. Микропроцессоры и микроконтроллеры.— СПб.: БХВ-Петербург, 2004.
4. Синегуб Н. И. Синтез устройств умножения/суммирования // Матер. міжнар. наук.-практ. конф. «Розвиток наукових досліджень». Т. 8.— Полтава: «ІнтерГрафіка», 2005.

К. т. н. С. А. ЕФИМЕНКО

Республика Казахстан, г. Сатпаев, корпорация «Казахмыс»
E-mail: Glavgeof@kazakhmys.kz

Дата поступления в редакцию
31.03 2008 г. — 23.01 2009 г.

Оппонент к. т. н. О. А. КОРОЛЁВ
(«Геотех», г. Санкт-Петербург)

АППАРАТУРА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ РУД РЛП-21

Разработан портативный энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный спектрометр (EDXRF) РЛП-21, который позволяет проводить экспресс-анализ проб руд, почв, продуктов обогащения и металлургических производств, одновременно определяя содержание 35 элементов.

Обеспечение качественного мониторинга вещественного состава руд с помощью лабораторных энергодисперсионных рентгенофлуоресцентных спектрометров (EDXRF) является, как и прежде, актуальной задачей горнодобывающей промышленности Казахстана. Республика до последнего времени не имела конкурентоспособного серийного EDXRF-спектрометра отечественного производства и собственного сервисного сопровождения, что тормозило массовое внедрение ядерно-геофизических методов опробования и анализа руд на предприятиях цветной металлургии. Этот пробел был успешно восполнен фирмой «Физик», собравшей последователей авторитетной школы алма-атинских физиков-теоретиков в области теории рентгенофлуоресцентного анализа, основанной Л. И. Шмониным и М. Б. Энкером.

EDXRF-спектрометр РЛП-21 [1, 2] разрабатывался для геофизической службы Жезказганского комплекса «Казахмыс» для проведения многоэлементного (не менее 19) высокоточного (по III категории точности согласно ОСТ 41-08-205-04 [3], что соответствует точности рядового химического анализа) анализа истертых порошковых и прессованных проб руд, горных пород, почв, продуктов обогащения и металлургического производств, отложений на фильтрующих элементах и пленках по универсальной методике (для разных продуктов используется одна градуировка). На момент проектирования РЛП-21 рынок не мог предложить EDXRF-спектрометра, полностью соответствовавшего предъявляемым требованиям, таким как высокая чувствительность к низкому содержанию серебра, кадмия и других элементов; надежная идентификация аналитических линий элементов; надежный количественный анализ элементов с частично или полностью взаимно накладывающимися аналитическими линиями; оптимальный учет соотношения линий в сериях при изменении вещественного состава руд; высокоэффективный учет эф-

фекта матрицы; оптимальный учет изменения параметров спектрометра с импульсной загрузкой; низкая величина долговременной нестабильности характеристик спектрометра; надежность в условиях круглогодичной эксплуатации; ценовая доступность.

Задача разработки спектрометра состояла в выборе полупроводникового детектора (ППД), способа его охлаждения, источника возбуждающего излучения, сопутствующей электроники, математического и программного обеспечения, чтобы в совокупности с достойным сервисным сопровождением обеспечить успешное продвижение спектрометра на казахстанском рынке. Так как дорогая электроника изначально не планировалась к применению, основным принципом разработки было разумное сочетание возможностей электроники, математики и программного обеспечения.

Задача разработки предопределила выбор технических средств:

1. Детектор — недорогой Si-Li ППД площадью 100 мм², охлаждаемый жидким азотом с относительно невысоким разрешением по линии MnK_{α} (5,9 кэВ) порядка 190—250 эВ (более дорогие ППД с разрешением порядка 140 эВ не применялись, потеря в разрешении компенсировалась за счет применения более мощного математического аппарата) и минимально возможным содержанием серебра в конструкции детекторной головки.

2. Источник ионизирующего излучения америций-241 типа ИГИА-3М (один комплект источников на весь срок эксплуатации спектрометра — оптимальный вариант с точки зрения бесперебойной работы спектрометра в условиях удаленных рудников) плюс промежуточная мишень.

3. Компьютер — настольный IBM PC, совместимый с процессором Pentium 4 (тактовая частота более 2,0 ГГц). Исполнение — Commercial (по требованию — Industrial).

Проблема учета влияния матричного эффекта на точность анализа была решена с использованием нетрадиционных приемов, характерных для алма-атинской школы [4]:

— вместо широко применяемого метода фундаментальных параметров применен высокоэффективный вариант метода фундаментальных коэффициентов, при котором поправки вводятся только на прямо или косвенно определяемые элементы (по корреляции: сера по железу, например);

— в полной мере учитывались эффекты второго, а в случае необходимости, и третьего порядка; влияние изменения геометрических условий измерений, вследствие вариации вещественного состава руд; реальный спектр возбуждающего излучения. Максимально использовалась информация, которую давали когерентная и некогерентная составляющие излучения мишени, рассеянного пробой руды.

Был разработан идентификатор аналитических линий элементов в аппаратурных спектрах с расширенными возможностями, т. е. идентификация линий производится по 14 параметрам с использованием всех линий *K*- и *L*-серий элементов. Идентификатор обеспечил высокую точность определения массовых концентраций элементов, аналитические линии которых имеют одинаковую энергию и накладываются в аппаратурных спектрах, например AsK_{α} и PbL_{α} . Тестирование идентификатора проводилось на двух государственных стандартных образцах вещественного состава руд ГСО-3596 ($C_{As}=1,21\%$; $C_{Pb}=0,56\%$) и ГСО-3597 ($C_{As}=3,96\%$; $C_{Pb}=0\%$). Результаты теста: ГСО-3596 — $C_{As}=1,21\%$; $C_{Pb}=0,57\%$, ГСО-3597 — $C_{As}=3,92\%$; $C_{Pb}=0,009\%$ — ложной «свинцовой» аномалии от мышьяка нет. Далеко не всякий EDXRF-спектрометр, представленный на рынке, способен дать такие результаты.

Методика анализа была нацелена на достижение высокой чувствительности к содержанию серебра и кадмия в диапазоне 1—10 ppm, чтобы обеспечить потребности комплексной многофункциональной системы рудоподготовки нового поколения в Жезказгане [5]. Пределы обнаружения, достигнутые на РПП-21 (экспозиция — 415 с), приведены в **таблице**. По ряду элементов они превышены за неимением более бедных ГСО.

Отметим, что РПП-21 успешно применяется для анализа руд месторождения Нурказган с крайне низким содержанием серебра (в среднем — 2,8 ppm) — это уникальный случай в практике EDXRF-спектроскопии [6].

Если в первых модификациях программного обеспечения применялся относительно простой алгоритм

расчета массовых концентраций определяемых элементов, выведенный из формулы Клейна–Нишины–Тамма для дифференциального сечения рассеяния квантов [8], приближения М. А. Блохина [9] и зависимости $\sigma_j^p = f(\mu_u)$ [10], то в программном обеспечении РПП-21 используется гораздо более сложный алгоритм. Он-то и обеспечил III категорию точности анализа на большинство элементов.

РПП-21 позволяет определять одновременно содержание до 35 элементов, в т. ч. Cu, Pb, Zn, Ag, Cd, Fe, As, Ba, Mn, Se, Sr, Y, Mo, с III категорией точности анализа по ОСТ-41-08-205-04.

Спектрометр РПП-21 конструктивно состоит из датчика, блока источников ионизирующего излучения, блока ППД, спектрометрического устройства (СУ), блока управления, механизма перемещения турели с пробами, персонального компьютера коммерческого исполнения и лазерного принтера.

В датчике размещены: блок источников ионизирующего излучения ИГИА-3М с промежуточной мишенью (барий или цезий), блок управления, ППД с предварительным усилителем сигналов, механизм перемещения турели с пробами, сосуд Дьюара.

Принцип работы спектрометра состоит в следующем. Кванты аналитических линий элементов, составляющих вещество пробы руды, возбуждаются излучением от промежуточной мишени, попадают на ППД, который вырабатывает импульсы (их амплитуда пропорциональна энергии излучения, а количество — содержанию) импульсы усиливаются и формируются зарядочувствительным малошумящим предварительным усилителем блока детектирования («ноу-хау» фирмы «Физик») и подаются на СУ — встроенный элемент, совмещенный с блоком управления и размещенный в датчике. СУ обеспечивает время-вариантное формирование импульсов (дифференцирующая линия задержки), стабилизацию базовой линии (уменьшение деградации разрешения и уменьшения сдвигов пиков аппаратурного спектра с ростом статистической загрузки), режекцию наложенных импульсов, учет «мертвого» времени, накопление информации в виде аппаратурного спектра [7]. СУ имеет в своем составе полный набор технических средств, необходимых для обеспечения работы собственно ППД, и также является «ноу-хау» фирмы «Физик».

Основные технические характеристики СУ: частота преобразований — 100 МГц, интегральная нелинейность — 0,05%, дифференциальная нелинейность — 1,00%, число каналов преобразований — 2048, постоянная времени дифференцирования линии задержки — до 24 мкс.

В конструкцию СУ включены микропроцессор DS5002FP и программируемая логическая интегральная схема типа FPGA. Программа для FPGA хранится в распределенной энергонезависимой памяти микропроцессора.

Программное обеспечение РПП-21 представляет собой интегрированную среду, включающую основную рабочую программу SbsWin и программу «Анализатор 10K20» (последняя может работать самосто-

Пределы обнаружения элементов (критерий 3σ)

Элемент	ГСО	Содержание по ГСО, ppm	Предел обнаружения, ppm
Ag	3029	2,1	1,35
Cd	4322	5,0	1,7
Nb	4322	50,0	4,1
Mo	3029	86,0	7,6
Sb	4322	30,0	2,3
Se	3593	20,0	5,7
Sn	4322	33,0	6,0
Sr	6586	90,0	3,3
U	4322	38,0	6,7
Zn	2887	0,011%	0,0054%
Pb	2887	0,037%	0,0060%
Cu	8076	0,036%	0,0043%

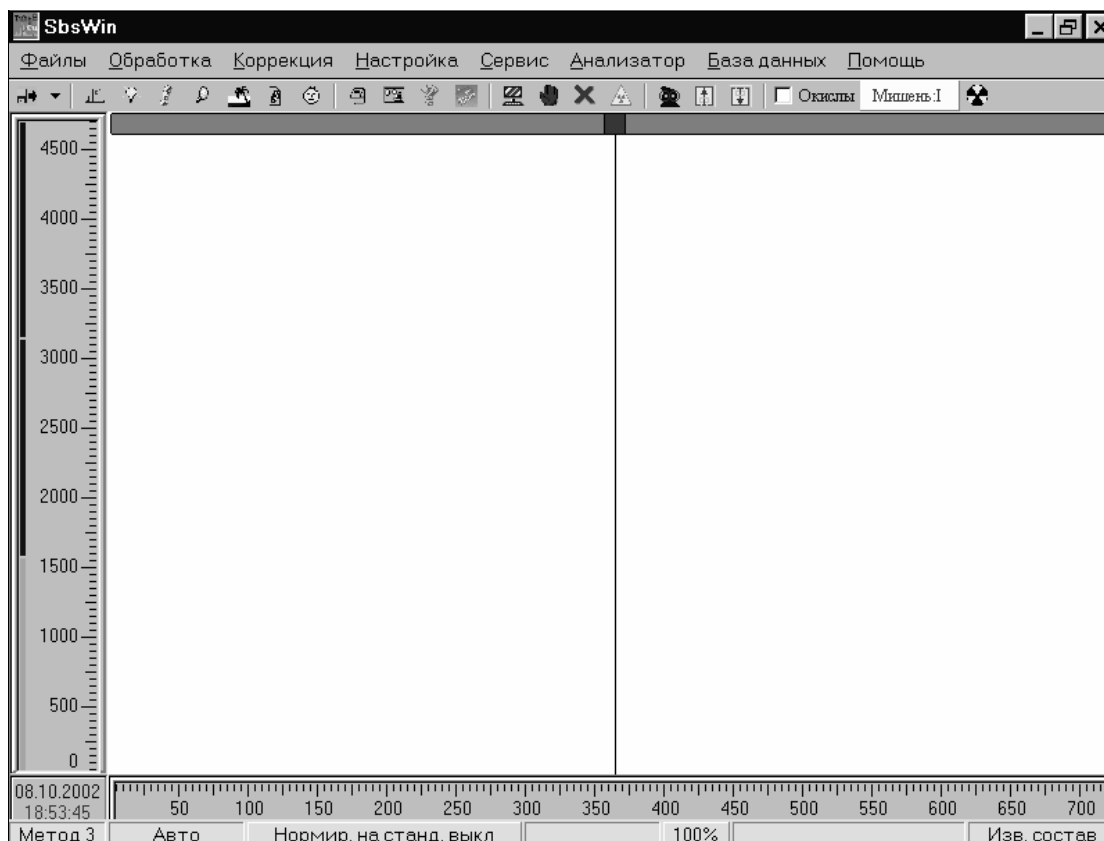


Рис. 1. Главное окно программы SbsWin

тельно). Загрузка рабочих программ производится в автоматическом режиме.

SbsWin — стандартное программно-методическое обеспечение, ориентированное как на использование источников ионизирующего излучения Am-241 (а также Pu-238 и Cd-109), так и на использование рентгеновской трубки. Вид главного рабочего окна программы SbsWin показан на **рис. 1**.

Основная программа SbsWin обеспечивает настройку параметров обработки набранных аппаратурных спектров; установку параметров обработки спектров; настройку режимов обработки спектров; настройку расчета содержаний элементов; работу с файлами.

При настройке параметров обработки имеющихся аппаратурных спектров задается: метод расчета содержания анализируемых элементов, предусмотренный данной методикой анализа; минимальный атомный номер определяемого элемента; эффективный атомный номер наполнителя; левая и правая границы энергии тормозного излучения, а также его эффективное значение и величина дифференциального приращения, используемая при расчете тормозного спектра (если используется рентгеновская трубка); время запуска и время ожидания окончания работы (механизм пробоподачи); время измерения при регистрации спектра от градуировочного образца при проведении энергетической калибровки спектрометра.

При установке параметров обработки спектров задаются параметры, используемые при поиске пиков и идентификации элементов; при расчете интенсивности аналитических линий анализируемых эле-

ментов и рассеянного образцом излучения; при расчете содержания элементов и выводе результатов.

Предусмотрено два режима обработки спектров — с фиксированным составом, когда круг определяемых элементов заранее известен, и с неизвестным составом, когда анализируемые элементы определяются по фотопикам аналитических линий.

При настройке режима обработки спектров с фиксированным составом задаются анализируемые элементы, элемент мишени, энергия радиоактивного источника или анода рентгеновской трубки, энергетический интервал обработки, геометрия измерения; интервалы обработки единичного элемента и рассеянного излучения, интервал суммирования площади пика рассеянного излучения. Вводится критерий соотношения интенсивностей K_{α} -линии и фона, выше которого L -серия элемента включается в обработку (для элементов, аналитические линии K - и L -серий которых одновременно попадают в энергетический диапазон). Производится выбор вида полинома, описывающего распределение фонового излучения, и выбор показателя его степени для каждого участка обработки. Задается минимальная разница энергий между наложенными пиками аналитических линий соседних элементов, при которой линии одной серии обрабатываются в связанном виде. По спектрам чистых элементов или их химических соединений строится полиномиальная функция спектрального распределения пиков двойных наложений (порядок полинома задается).

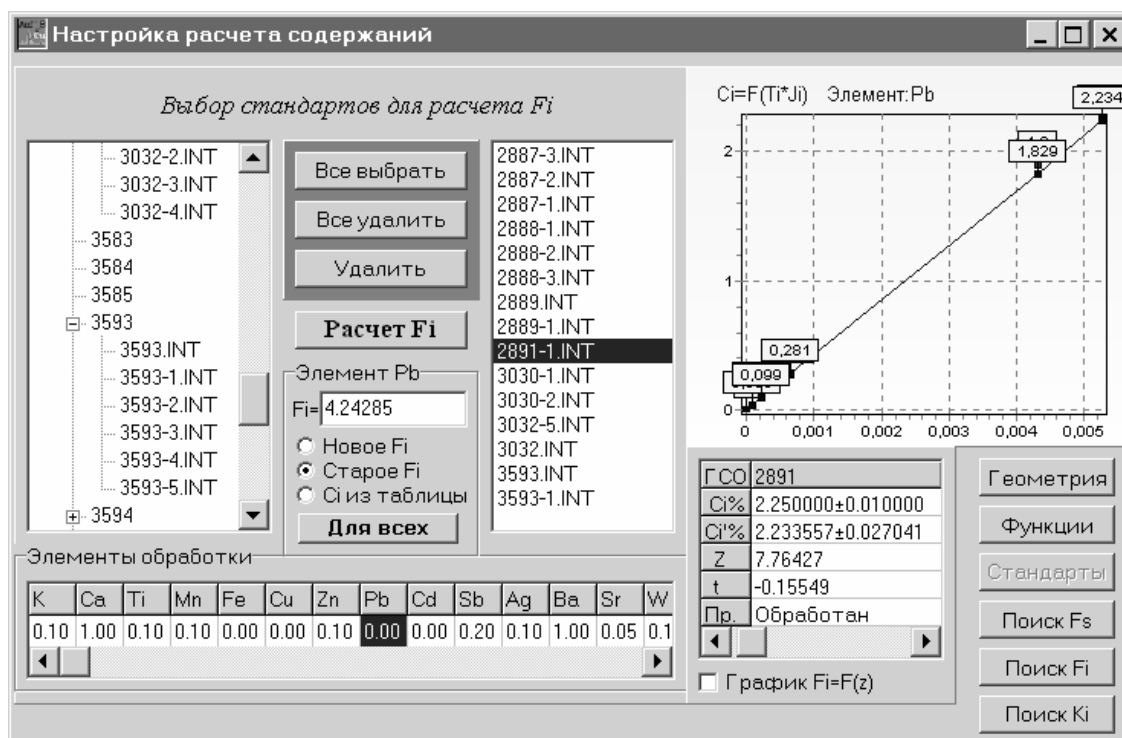


Рис. 2

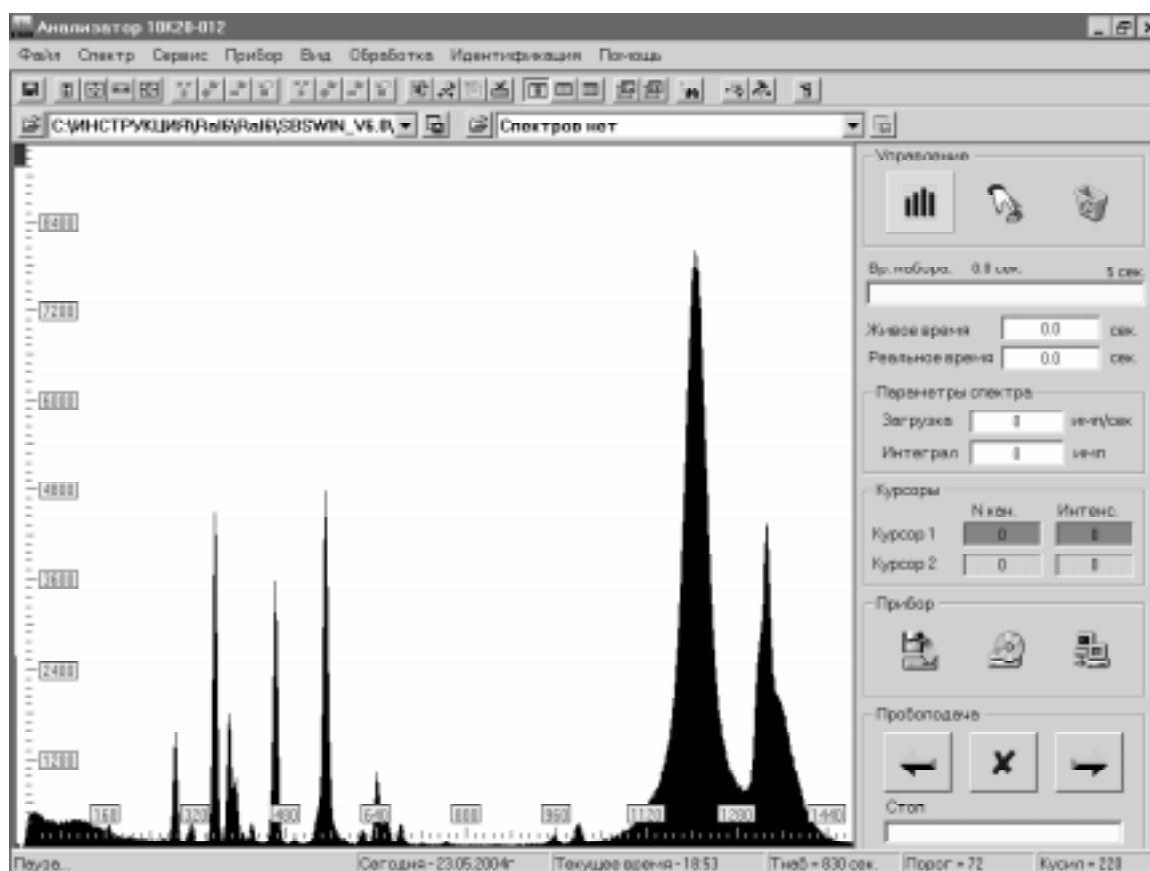


Рис. 3

При настройке режима обработки спектров с неизвестным составом задаются параметры математических фильтров, используемых при поиске пиков (процедура идентификации элементов) и при их проверке на мультиплетность, минимальное расстояние между соседними пиками и коэффициент значимости их превышения над фоновым распределением (аналогичные параметры устанавливаются для анализа разностного спектра), фиксированное значение показателя степени полинома (только для участка рассеянного излучения, для остальных же участков показатель выбирается автоматически, в зависимости от энергетической протяженности сформированного участка). Формируется только участок обработки рассеянного излучения, а остальные формируются автоматически по результатам поиска анализируемых элементов. Анализируемые элементы не задаются — их поиск происходит автоматически при обработке спектров.

Настройка расчета содержания элементов выполняется на массиве спектров, полученных на ГСО. При обработке спектров расчет содержания элементов не проводится, а используются их аттестованные значения. Результатом обработки является создание промежуточных рабочих файлов, содержащих информацию о расчетной интенсивности аналитических линий элементов и рассеянного излучения, предназначенную для настройки методики расчета определяемых элементов. Программа предусматривает два варианта: «Поиск Fi» (настраивается методика анализа образцов, содержащих в качестве наполнителя неопределяемые данной методикой элементы) и «Поиск Ki» (настраивается методика анализа образцов, в которых суммарное содержание определяемых элементов равно 100%). Режим расчета устанавливается для каждого настраиваемого элемента. Результатом является пять параметров: номер ГСО, аттестованное значение содержания определяемого элемента C_i в %, расчетное значение содержания C_{ip} , запас точности Z и критерий значимости систематического расхождения C_i и C_{ip} (критерий «ничтожной» погрешности — КНП). Настройка считается законченной, если $Z > 1$ (III категория точности анализа) и $КНП \leq 0,31$ [3]. Вид окна «Настройка расчета содержаний» приведен на **рис. 2**.

Загруженный из файла спектр может быть обработан как в автоматическом режиме, так и в полуавтоматическом (позаппная обработка).

Программа «Анализатор 10K20» предназначена для управления работой спектрометра. Вид ее главного рабочего окна показан на **рис. 3**.

Выводы

Таким образом, разработанный EDXRF-спектрометр РЛП-21 представляет собой законченное высокотехнологичное изделие, оснащенное универсаль-

ной методикой анализа, которое отличается долговременной стабильностью работы. Аппаратура годами не требует периодической градуировки (только еженедельную калибровку на турели), способна анализировать любые пробы руд по единой градуировке, которая уточняется на стадии пуско-наладочных работ.

Отметим, что спектрометр РЛП-21 включен в Государственный реестр средств измерений Республики Казахстан. В настоящее время запущены в производство модификации РЛП-21: РЛП-21ТЖ (рентгеновская трубка вместо радиоактивных источников, охлаждение ППД жидким азотом) и РЛП-21Т (рентгеновская трубка, охлаждение ППД с помощью термохолодильника Пельтье).

С внедрением РЛП-21 и его модификаций на горных и обогащательных производствах «Казахмыс» удалось организовать эффективный геологический мониторинг на подземных и открытых рудниках, на обогащательном производстве, на хвостохранилищах обогащательных фабрик, на разведываемых месторождениях.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ефименко С. А. Рентгенофлуоресцентный энергодисперсионный лабораторный анализатор РЛП-21 // Матер. II Междунар. форума «Аналитика и аналитики». — Воронеж: ВГТА. — 2008. — Т. 1. — С. 228.
2. Ефименко С. А. Аппаратура экологического мониторинга РЛП-21 // Труды 9-й Междунар. науч.-практич. конф. «СИЭТ-2008». — Одесса. — 2008. — Т. 2. — С. 221.
3. ОСТ 41-08-205-04. Управление качеством аналитических работ: Порядок и содержание работы по аттестации методик количественного анализа минерального сырья. Стандарт отрасли. Методики количественного химического анализа.
4. Ефименко С. А. Совершенствование системы геологического обслуживания горных работ на шахтах Жезказгана с помощью рентгенорадиометрического метода // Матер. междунар. конф. «Рудогенез-2008». — Миасс-Екатеринбург: УрО РАН. — 2008. — С. 95—100.
5. Ефименко С. А. Многофункциональная рентгенорадиометрическая система рудоподготовки для шахт ПО «Жезказганцветмет» // Тр. Карагандинского ГТУ. — 2008. — № 1. — С. 54—59.
6. Ефименко С. А. Ядерно-геофизические методы исследования жезказганских руд // Матер. ежегодного семинара по эксперимент. минералогии, петрографии и геохимии «ЕСЭМПГ-2008». — Москва, ОНТИ ГЕОХИ РАН. — 2008. — С. 25—26.
7. Белоусов М. П., Игнатьев О. В., Пулин А. Д. Сравнительный анализ корректоров просчетов для прецизионных X-спектрометров с ППД // Аналитика и контроль. — 2000. — № 4. — Т. 6. — С. 434—440.
8. Бахтияров А. В. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ в геологии и геохимии. — Ленинград: Недра, 1985.
9. Блохин М. А., Швейцер И. Г. Рентгеноспектральный справочник. — М: Атомиздат, 1982.
10. Фролов Ю. В., Поддуб А. А., Ефименко С. А. Рентгенорадиометрический анализ руд и продуктов переработки на сопутствующие элементы // Обогащение руд. — 1990. — № 6. — С. 30—31.

Д. ф.-м. н. Ф. Д. КАСИМОВ, к. т. н. Р. А. ИБРАГИМОВ,
Н. М. СВИХНУШИН

Азербайджан, г. Баку, Национальная академия авиации
E-mail: fredkasimi@mail.ru

Дата поступления в редакцию
28.11 2008 г.

Оппоненты: к. т. н. В. С. ГОЛУБ
(НПФ «VD MAIS», г. Киев)
к. т. н. Ю. А. АВЕРЬЯНОВА (НАУ, г. Киев)

МАГНИТОКОММУТИРУЕМАЯ МИКРОСХЕМА И ДАТЧИК ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ВЕТРА НА ЕЕ ОСНОВЕ

Разработанная магнитокоммутируемая микросхема на основе эффекта Холла позволила создать магнитный датчик скорости ветра.

Интегральные микропреобразователи различных физических величин активно разрабатываются в последние десятилетия. Среди них важную роль играют магниточувствительные микросхемы, поскольку являются бесконтактными и сохраняют работоспособность в условиях высокой загрязненности и плохой видимости, в которых не могут работать фоточувствительные преобразователи.

В настоящее время применяются магниточувствительные микросхемы как с цифровым, так и с линейным выходом, изготавливаемые по гибридно-пленочной [1], биполярной [2, 3] и МОП-технологиям [4, 5], а также с частотным выходом [6].

Типичные магниточувствительные коммутирующие микросхемы (МКМ), выпускаемые различными фирмами, состоят из датчика Холла (ДХ), дифференциального усилителя (ДУ), порогового устройства и выходного логического каскада.

В качестве усилителя в [3] использован дифференциальный каскад на $n-p-n$ -транзисторах $VT1, VT2$ с резистивной нагрузкой $R1, R3$ и токозадающим резистором $R2$ (рис. 1). К коллекторам транзисторов ДУ подключена бистабильная схема, выполненная на $n-p-n$ -транзисторах $VT3, VT4$ с эмиттерной связью. Резистор $R3$ является одновременно коллекторной нагрузкой транзистора и правого плеча ДУ. Нагрузкой транзистора $VT4$ служит прямосмещенный $p-n$ -переход база-эмиттер $p-n$ -транзистора $VT5$, с коллектора которого снимается инвертированный выходной токовый сигнал, представляющий собой единичную функцию переключения. Выходной сигнал далее усиливается эмиттерным повторителем на $n-p-n$ -транзисторе $VT6$ и через два резистивных делителя, ограничивающих эмиттерный ток, поступает на базы выходных транзисторов $VT7, VT8$ с открытым коллектором. Магнитная индукция переключения подобных МКМ лежит в пределах 10–50 мТ.

Для повышения стабильности параметров МКМ и расширения диапазона питающего напряжения в нее включен внутренний стабилизатор напряжения на транзисторе $VT9$, стабилитроне $VD3$ и токозадающем

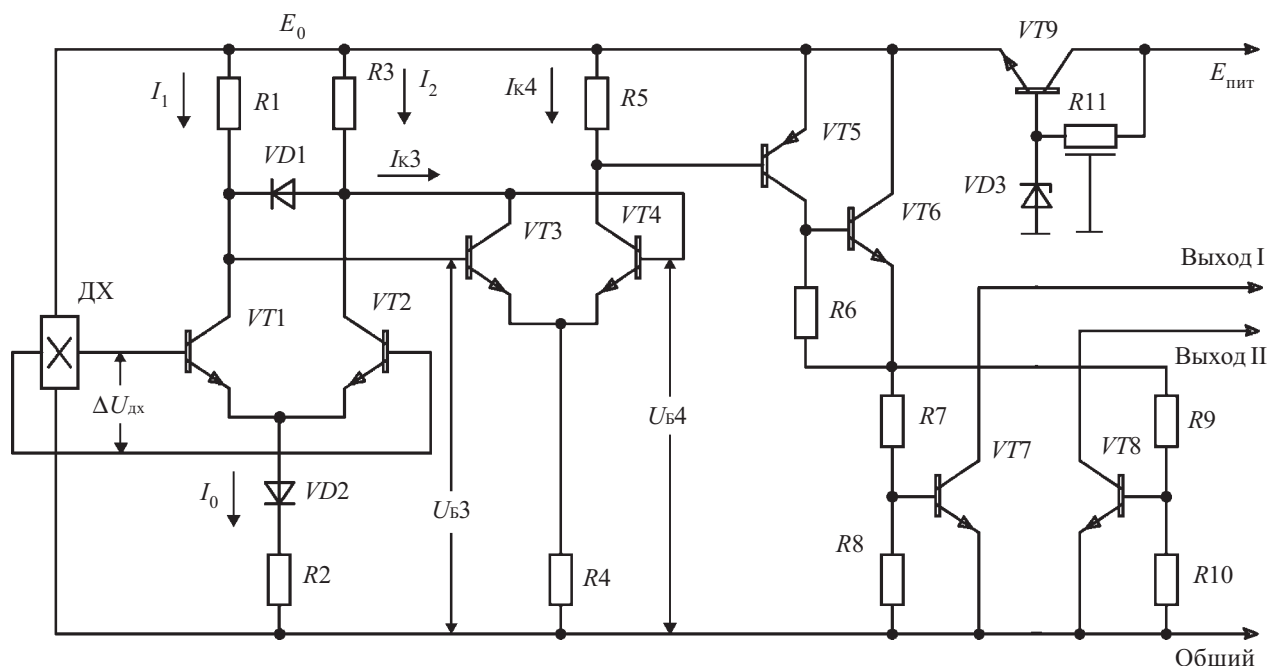


Рис. 1. Электрическая схема МКМ без термокомпенсации

резисторе $R11$. Стабилизатор обеспечивает внутреннее питание схемы напряжением 5 В независимо от приложенного внешнего в диапазоне 9—30 В.

Практическое применение МКМ в различных устройствах авиационного приборостроения выявило необходимость доработки схемы с целью повышения магнитной чувствительности и температурной стабильности в широком диапазоне изменения внешней температуры, а также возможности с помощью внешних подстроечных резисторов регулировать величину гистерезиса и магнитной индукции переключения [7].

Улучшенная МКМ, разработанная авторами (рис. 2), состоит из ДУ, ко входу которого подключен ДХ (на схеме обозначен B), согласующего усилителя (СУ), выходного каскада, вторичного стабилизатора напряжения и цепи положительной обратной связи.

Повышение чувствительности достигнуто путем увеличения суммарного коэффициента усиления ДУ и СУ. Коэффициент усиления ДУ обеспечивается за счет применения активной нагрузки усилителя ($VT8$) вместо пассивной (резисторов). В СУ сигнал с эмиттера транзистора $VT14$ усиливается транзисторной парой, включенной по схеме Дарлингтона и нагруженной на эталон тока (коллектор транзистора $VT18$).

Использование эталона тока обеспечивает максимально возможный коэффициент усиления каскада.

Для получения положительной обратной связи используется резистивный делитель на резисторах $R3$, $R4$, $R5$ и $R11$, $R13$, $R14$. Выводы 2 и 3 от резистивного делителя дают возможность смещать характеристики вправо или влево от нуля индукции срабатывания. В зависимости от направления сдвига внешним резистором вывод 1 стабилизированного напряжения соединяется с выводом 2 или 3. Величина сдвига обратно пропорциональна величине сопротивления внешнего резистора. Регулировка величины гистерезиса производится путем соединения через внешний резистор вывода 4 с общим выводом схемы. Если вывод 4 замкнут накоротко с общим выводом, гистерезис минимален, а если разомкнут — максимален.

Экспериментальные исследования показали, что температурная стабильность ДХ при питании стабильным напряжением выше, чем при питании стабильным током, поэтому была выбрана схема питания ДХ постоянным стабилизированным напряжением от вторичного стабилизатора.

Выходной каскад состоит из транзистора $VT22$ с открытым коллектором, а уровни его выходных напряжений и токов соответствуют параметрам стандарт-

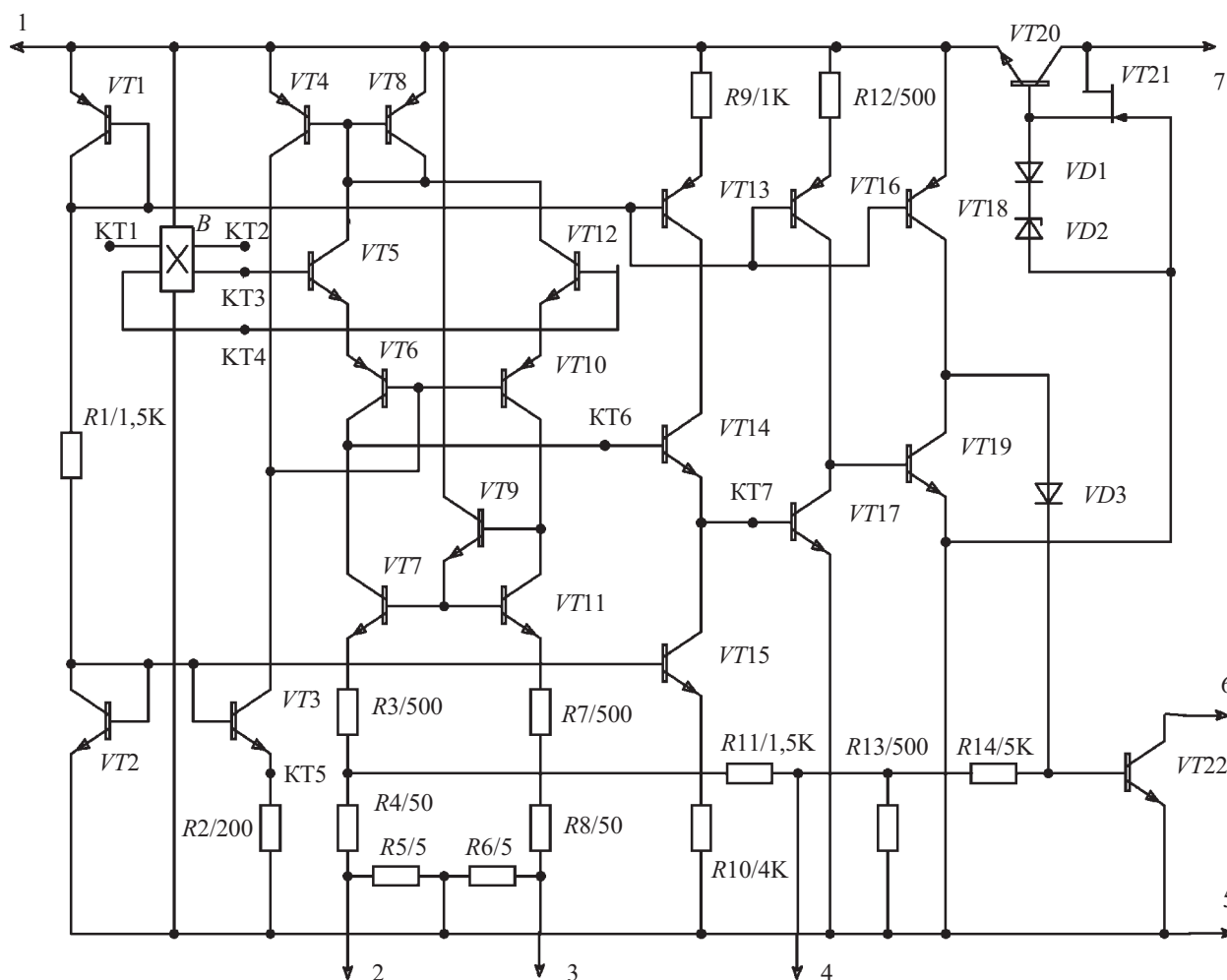


Рис. 2. Электрическая схема высокочувствительной МКМ с термокомпенсацией

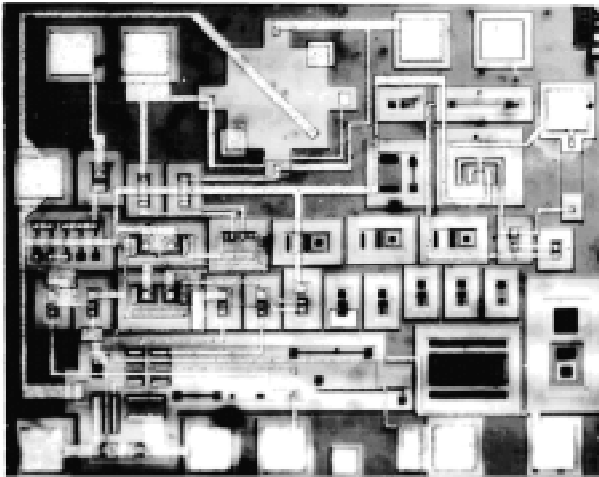


Рис. 3. Высокочувствительная МКМ с термокомпенсацией

ных ТТЛ-интегральных схем. Напряжение питания МКМ составляет от 9 до 27 В, ток потребления — 6 мА, магнитная индукция переключения лежит в диапазоне 5—25 мТ.

Основной проблемой магниточувствительных ИС с ДХ является температурный и временной дрейфы остаточного напряжения ДХ, связанные с перераспределением упругих механических напряжений в объеме кристалла ДХ, возникающих при изменении температуры и протекании тока. Для устранения временных дрейфов ДХ был сконструирован в виде четырех ортогонально соединенных холловских элементов. Такое соединение позволило обеспечить снижение влияния механических напряжений на остаточное напряжение ДХ. Помимо этого, для уменьшения влияния дрейфа положительных ионов на границе Si-SiO₂ на величину остаточного напряжения проводилось ионное легирование рабочей поверхности ДХ атомами бора. Тем самым на поверхности создавался тонкий слой *p*-типа проводимости, отделяющий объем *n*-типа проводимости от границы Si-SiO₂. Указанные меры позволили снизить дрейф остаточного напряжения до 0,02 мВ/°С.

Микрофотография МКМ на кристалле с повышенной температурной стабильностью приведена на рис. 3.

Сравнительный анализ параметров различных МКМ, приведенных в таблице, показывает, что микросхема собственной разработки (1159КП1) не усту-

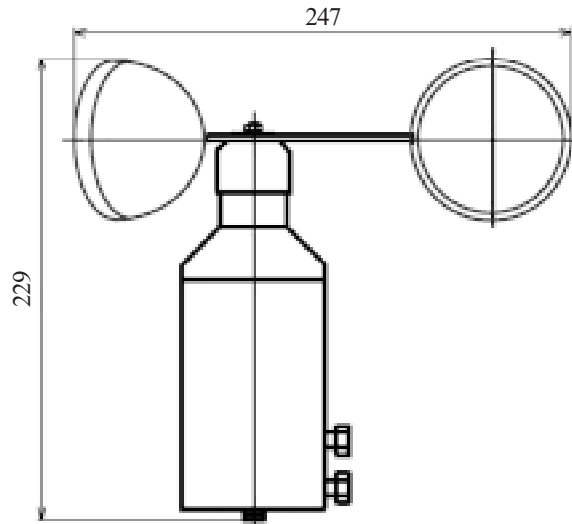


Рис. 4. Датчик скорости ветра

пает зарубежным аналогам, а по некоторым параметрам и превосходит их [8, с. 197]. Это позволяет применять ее в различных устройствах авиационного приборостроения с жесткими условиями эксплуатации.

По заказу ЗАО «Азербайджанские авиалинии» был разработан датчик скорости ветра для эксплуатации в условиях повышенной запыленности, основанный, в отличие от традиционно применяемых устройств, не на оптическом датчике, а на магнитокоммутируемой микросхеме 1159КП1. Это позволило, не удорожая конструкцию датчика дополнительными затратами на защиту от пыли, применить типовую конструкцию чашечной вертушки.

Магнитный датчик скорости ветра состоит из вала с вертушкой (рис. 4), на конце которого закреплен многополюсный круговой магнит, и печатной платы с МКМ и другими элементами схемы (рис. 5).

При вращении вертушки под воздействием поля магнита изменяется состояние выхода МКМ и формируются счетные импульсы, частота следования которых пропорциональна скорости ветра. Электрические импульсы с выхода 2 DA2 поступают на вход 3 сетевого драйвера RS422 DA3, с выхода которого симметричный сигнал по сетевому кабелю «витая пара» подается в блок обработки сигналов, разработанный на базе микроконтроллера. В блоке обработки частота импульсов датчика преобразуется в физическую величину скорости ветра и результаты изме-

Параметры МКМ

Тип МКМ	Индукция переключения, min/max, мТ	Индукция гистерезиса, мТ	Ток потребления $I_{ном}$, мА	Диапазон температур, °С
K1116КПЗ СССР	20/35	5	6	-40—+125
1AV2A Honeywell, США	40/45	10	13	-40—+150
SAS 221S4, «Siemens», ФРГ	25/40	5	7	-40—+125
TL172 Texas Instrument, США	10/60	40	—	-40—+125
DGN 3203 «Sprague», США	10/35	20	—	-40—+125
S6SS2 Microswitch, США	12/62	40	—	-40—+150
МКМ 1159КП1 Азербайджан	5/15	2	6	-60—+125

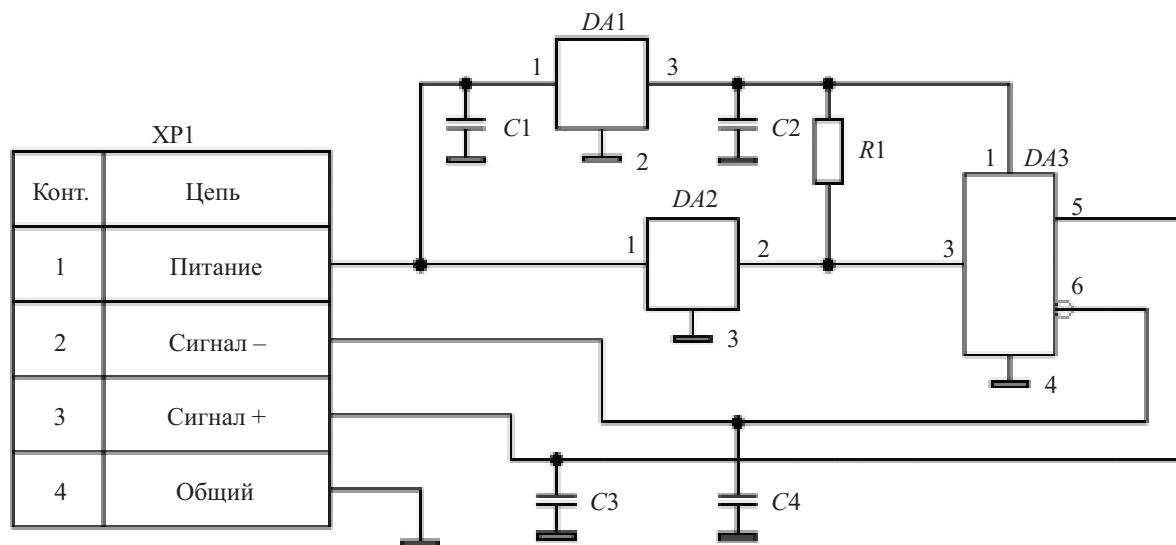


Рис. 5. Электрическая схема датчика скорости ветра:
DA1 — KP142EH5A; DA2 — 1159KP1; DA3 — сетевой драйвер RS422 MAX 488

рений передаются на компьютер для доставки их пользователям.

Диапазон измерения скорости ветра составил 0,5—50 м/с с погрешностью $\pm 5\%$.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Касимов Ф. Д., Адигезалов Г. Д., Карпов А. Г., Стоялов М. Н. Магниточувствительная гибридно-пленочная ИС // Приборы и системы управления.— 1986.— № 7.— С. 34—35.
2. Марченко А. Н. K1116KP — серия магнитоуправляемых ИС на эффекте Холла // Электронная промышленность.— 1985.— № 6.— С. 11—13.
3. Касимов Ф. Д., Рагимов С. Н. Кремниевый преобразователь магнитного поля // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника.— 1991.— Вып. 4 (143).— С. 15—17.

4. Галушков А. И., Чаплыгин Ю. А. Интегральные магниточувствительные микросхемы // Известия Вузов. Электроника.— Москва.— 2000.— № 4—5.— С. 124—127.

5. Галушков А. И. КМОП магниточувствительные интегральные схемы // Контрольно-измерительные приборы.— 2000.— № 1.— С. 25—26.

6. Holzlein K., Lapik J. Silicon magnetic field sensor with frequency output // Sensor and Actuator.— 1991.— Vol. A25—27.— P. 349—355.

7. Пашаев А. М., Касимов Ф. Д., Исмаилов Н. М. Интегральные магниточувствительные схемы для авиационного приборостроения // Труды 6-й МНПК «Современные информационные и электронные технологии».— Одесса.— 2005.— С. 265.

8. Касимов Ф. Д., Гусейнов Я. Ю., Негоденко О. Н., Румянцев К. Е. Микроэлектронные преобразователи на основе негatronных элементов и устройств.— Баку: ЭЛМ, 2001.

НОВЫЕ КНИГИ

Портнов Э. Л. Принципы построения первичных сетей и оптические кабельные линии связи. Учебное пособие для вузов.— М.: Горячая линия — Телеком, 2009.— 544 с.

Систематизированы сведения о первичных сетях связи, принципах проектирования, строительства, измерений и эксплуатации, о месте волоконно-оптических линий в этих сетях. Рассмотрены конструктивные особенности и технические характеристики существующих типов оптических волокон (ОВ) и оптических кабелей, применяемых на взаимоувязанной сети связи Российской Федерации, теоретические и практические вопросы, связанные с использованием ОК на различных линиях сети с применением оптических усилителей и регенераторов. Описаны основные передаточные характеристики ОВ и нелинейные эффекты, возникающие в ОВ при передаче сигналов по линии с учетом различных элементов, без которых данная линия не может функционировать. Рассмотрены основные принципы измерений, проектирования, строительства и эксплуатации кабельных оптических линий.

Для студентов, обучающихся по направлению «Телекоммуникации», будет полезна работникам предприятий связи, проектных отделов и техническим специалистам.



К. т. н. В. П. СИДОРЕНКО, д. т. н. В. Г. ВЕРБИЦКИЙ,
Ю. В. ПРОКОФЬЕВ, к. ф.-м. н. А. Ю. КИЗЯК,
к. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО

Украина, г. Киев, НИИ микроприборов
E-mail: sidorenko@imd.org.ua

Дата поступления в редакцию
19.12.2008 г.

Оппонент д. т. н. В. В. БАРАНОВ
(БГУИР, г. Минск)

СБИС ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОННОГО КООРДИНАТНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА ПРИБОРОВ ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА МАТЕРИАЛОВ

Разработана СБИС, обеспечивающая одновременный анализ всех входящих в состав вещества элементов с высокой чувствительностью и точностью. Ее применение позволяет значительно снизить массу, габариты и энергопотребление детектора.

Неотъемлемой частью процесса технологического перевооружения промышленности является создание аналитической аппаратуры для количественного анализа многоэлементных веществ, которая позволяет за короткое время и с высокой точностью проводить анализ материалов в процессе разработки новейших технологий в машиностроении, материаловедении, при поиске и добыче полезных ископаемых, а также в микроэлектронике, медицине, криминалистике, охране окружающей среды. К таким приборам относится лазерный масс-спектрометр с удлиненной фокальной плоскостью анализатора, дающей возможность проводить одновременный элементный анализ твердотельных образцов, различных по составу и физико-химическим свойствам, без специальной подготовки проб.

В качестве регистрирующего устройства в таких масс-спектрометрах используется фотографическая пластинка, что обуславливает ряд недостатков, главным из которых является невозможность наблюдения и, при необходимости, вмешательства в процесс регистрации ионов изотопов в реальном масштабе времени. Это особенно важно при элементном анализе различных по физико-химическим свойствам многокомпонентных примесей в основе вещества, поскольку точность их определения в значительной степени зависит от процесса юстировки масс-спектрометра.

Использование микроэлектронного координатно-чувствительного детектора (МКЧД) ионов, содержащего интегральную схему и умножитель электронов в виде микроканальной пластины (МКП) в качестве приемника ионов изотопов различных элементов, позволяет регистрировать результаты анализа в реальном масштабе времени и проводить юстировку масс-спектрометра по конкретным изотомам примесных элементов, что повышает точность и чувствительность анализа при уменьшении затрат пробы [1, 2].

В настоящей работе представлены результаты разработки СБИС, которая в составе МКЧД обеспечивает одновременное детектирование разделенного в пространстве спектра ионов, принимая и обрабатывая информацию об интенсивности потоков частиц различной массы. Размеры СБИС определяются количеством электродов-датчиков (в дальнейшем электроды) и соответствующих им каналов обработки информации.

Общая характеристика СБИС

СБИС в составе МКЧД обеспечивает одновременное детектирование ионов изотопов элементов в широком спектре масс исследуемого вещества и в широком диапазоне концентраций — от 10^{-7} до 100%. Микросхема содержит 384 канала приема и обработки информации и обеспечивает прием электронов электродами, преобразование заряда электронов в счетные импульсы, подсчет их 10-разрядными двоичными счетчиками и считывание результатов счета.

Чувствительность БИС по каждому входу — 10^6 электронов/импульс.

Максимальная частота счета импульсов счетчика — 5—10 МГц.

Протокол обмена информацией микросхемы с периферией — последовательный, максимальная частота обмена — 4 МГц.

БИС изготавливается по КМОП-технологии с карманами N-типа. Размер кристалла — $10,05 \times 10,2$ мм.

Микросхема выполняется бескорпусной на гибких носителях типа алюминий полиимид (модификация 2). Конструкция микросхемы обеспечивает монтаж на керамическую плату, разварку и герметизацию внешних выводов, монтаж микроканальных пластин (МКП) над областью электродов и позволяет устанавливать в составе МКЧД до пяти СБИС.

СБИС сохраняет электрические параметры, требуемую стойкость к механическим и климатическим факторам, а также возможность функционирования при давлении 10^{-5} Па.

Структурная схема и режимы работы СБИС

Схематическое изображение процесса формирования импульса электронов в МКЧД, структурная схема и временная диаграмма работы СБИС представлены на рис. 1—3.

Импульс электронов, падающих на электроды от микроканального умножителя (рис. 1), поступает на

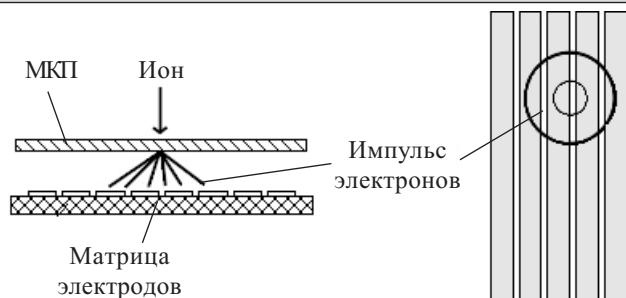


Рис. 1. Формирование импульса электронов в МКЧД

один из входов дифференциального каскада усилителя (рис. 2), разряжает его входную емкость и понижает потенциал на этом входе. На второй вход подается опорное напряжение от внешней контактной площадки U_{op} . Уровень опорного напряжения устанавливается потребителем и может изменяться с требуемым шагом в диапазоне от 1,5 до 3,5 В. Если разница напряжений на входах достаточна для срабатывания усилителя, то на выходе последнего формируется импульс, который подается на вход десятиразрядного счетчика. В разработанной СБИС используется 384 электрода, каждому из которых соответствуют свои усилитель и счетчик, образуя 384 канала при-

ема и обработки информации о распределенных в пространстве ионах (пучках электронов).

В процессе счета (рис. 3), когда количество единиц хотя бы одного из счетчиков достигает 1020, на внешней контактной площадке PP формируется напряжение низкого уровня, что означает переполнение хотя бы одного счетчика. При этом вход переполненного счетчика блокируется, а другие (не переполненные) счетчики могут продолжать считать. После завершения считывания информации из переполненных счетчиков на внешнем выводе PP снова формируется напряжение высокого уровня. Счет может быть остановлен также по желанию потребителя путем подачи напряжения низкого уровня на внешний вывод ($STOP$). В этом случае блокируются входы всех счетчиков СБИС.

Для считывания информации из счетчиков на внешний вывод $READ$ подается напряжение высокого уровня, на вывод CLK — импульсы тактирования считывания (по каждому импульсу низкого уровня выполняется последовательное считывание счетчиков СБИС), на вывод $BREK$ — импульс высокого уровня (начало считывания кристалла), который по спаду должен перекрывать первый импульс тактирования (CLK) низкого уровня.

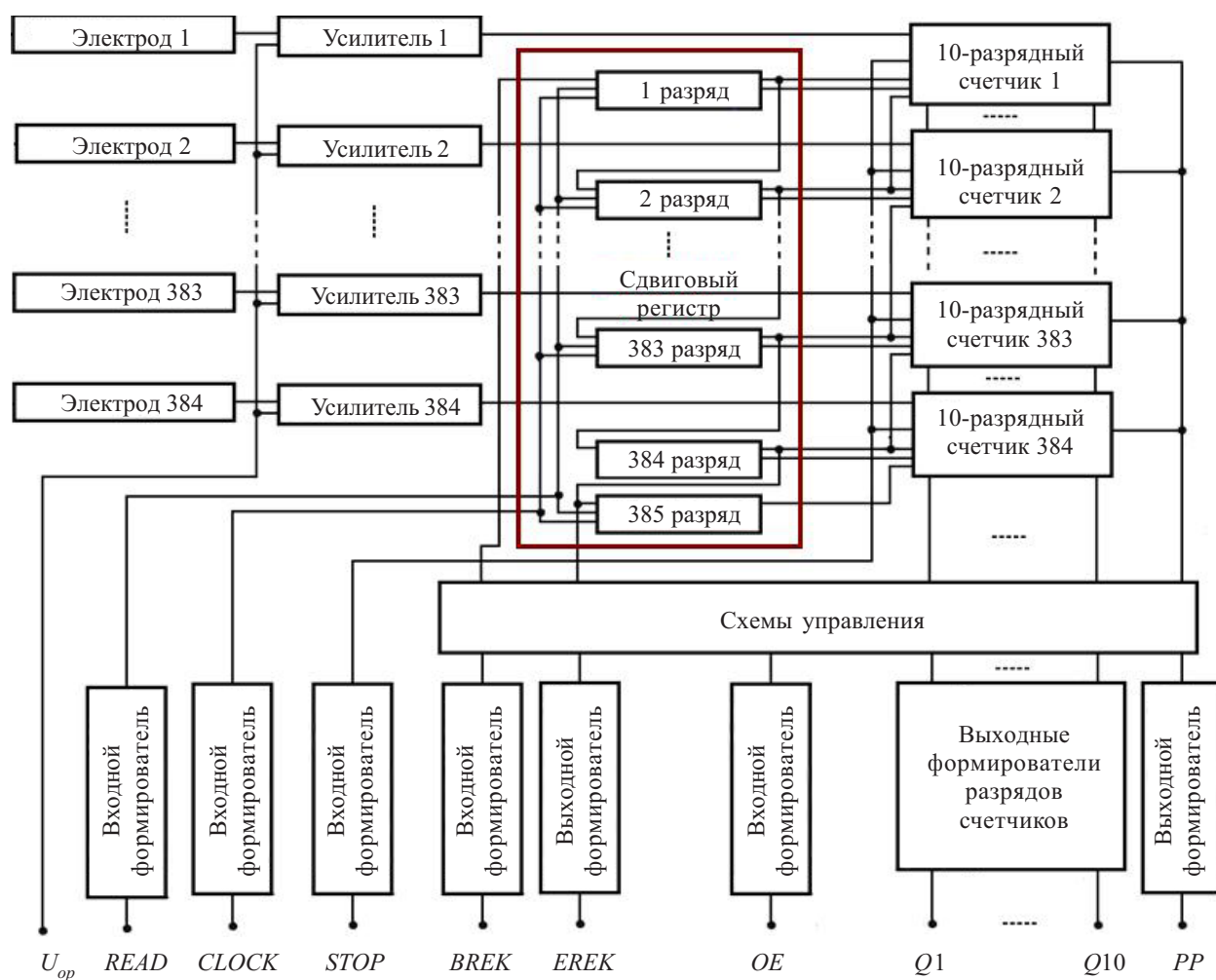


Рис. 2. Структурная схема СБИС

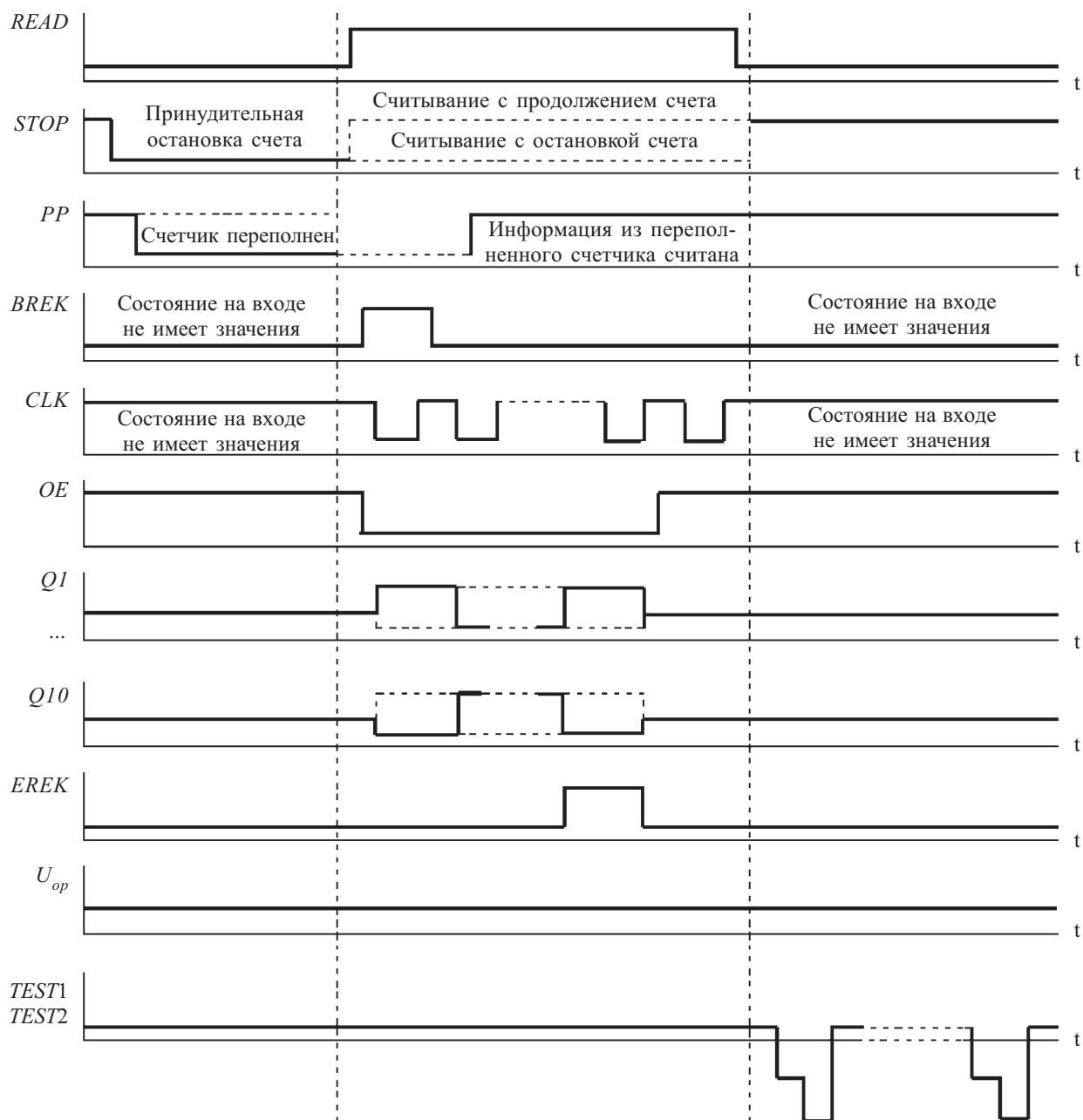


Рис. 3. Временная диаграмма работы СБИС

По спаду импульса *BREK* на вывод *OE* нужно подать напряжение низкого уровня, включающее выходные формирователи информации *Q1*—*Q10*.

После окончания считывания последнего, 384-го, счетчика, расположенного на кристалле, на внешнем выводе *ERЕК* (конец считывания кристалла) появляется импульс высокого уровня, который может быть использован в качестве импульса *BREK* для считывания информации из следующего кристалла, расположенного на плате.

В разработанной СБИС реализованы три варианта считывания.

В первом варианте считывание выполняется без прекращения счета. В этом случае блокируется счет только в том счетчике, информация из которого считывается. После окончания считывания счетчика (во

время считывания информации из следующего счетчика) осуществляется сброс счетчика, и блокировка счета в нем снимается.

Во втором варианте по команде *STOP* блокируется счет во всех счетчиках и выполняется последовательное считывание информации со всех счетчиков с последующим их обнулением после считывания. После окончания считывания снимается блокировка и возобновляется счет.

В третьем варианте считывание производится после появления признака переполнения (низкий уровень напряжения на выводе *PP*) хотя бы одного из счетчиков. При этом процесс собственно считывания реализуется по первому или второму варианту.

Для контроля функционирования кристалла в СБИС предусмотрены внешние выходы *TEST1* и

TEST2 (на рис. 2 не показаны). На них подается отрицательный импульс специальной формы, который за счет емкостной связи создает на электродах детектора потенциал, имитирующий импульс электронов от микроканального умножителя. Путем изменения напряжения на указанных выводах можно проконтролировать работоспособность кристалла и оценить чувствительность и быстродействие усилителя.

Конструкция и технология изготовления СБИС

Разработка топологического чертежа проводилась с учетом конструктивно-технологических ограничений для КМОП-технологии с карманом *N*-типа, а также требований, предъявляемых к электрическим параметрам и сборке кристалла на гибкий носитель. При этом топология кристалла и конструкция гибкого носителя обеспечивают возможность установки на плате МКЧД от одного до пяти СБИС на гибком носителе.

Электроды 1—384					
Входные усилители					
Счетчик 321—384	Счетчик 257—320	Счетчик 193—256	Счетчик 129—192	Счетчик 65—128	Счетчик 1—64
Схемы управления Формирователи входа-выхода					

Рис. 4. Компоновка узлов СБИС

В процессе разработки конструкции кристалла была решена задача оптимального размещения основных функциональных узлов СБИС. Выбранный вариант компоновки кристалла изображен на **рис. 4**. В центральной части кристалла расположен массив 10-разрядных счетчиков, состоящий из 6 столбцов по 64 счетчика каждый (**рис. 5**). В верхней части кристалла расположены электроды-датчики, тестовые электроды и входные усилители. Нижняя часть содержит узлы схемы управления, выходные усилители, формирователи входных и выходных сигналов, а также внешние контактные площадки. В зоне разделения кристаллов расположена тестовая структура.



Рис. 5. Фотография кристалла

Основные параметры конструкции: размер кристалла — 10,05 мм × 10,2 мм; размер электрода-датчика — 18 мкм × 2 мм; шаг — 25 мкм; количество элементов — 143489, в том числе МОП-транзисторов — 142322, диодов — 394, резисторов — 389, конденсаторов — 384.

Для контроля качества фотолитографического процесса на кристалле размещены структуры экспресс-контроля «ухода» размеров и «рассовмещения» слоев с шагом 0,1 мкм. Оптимальное размещение функциональных узлов и технологических структур на рабочей поверхности кристалла обеспечило его минимальные размеры — 10,05 и 10,2 мм соответственно по координатам *X* и *Y*.

Для реализации описанной выше СБИС был разработан и рассчитан технологический маршрут изготовления данной схемы. В качестве базового при разработке технологического маршрута использована модифицированная КМОП-технология с одним уровнем поликремния и двумя уровнями металла. СБИС была изготовлена на *p*-Si подложках КДБ-10-12/(100).

Технологический маршрут включает одиннадцать фотолитографий для формирования следующих слоев: области *n*-карманов; активные области; пассив-

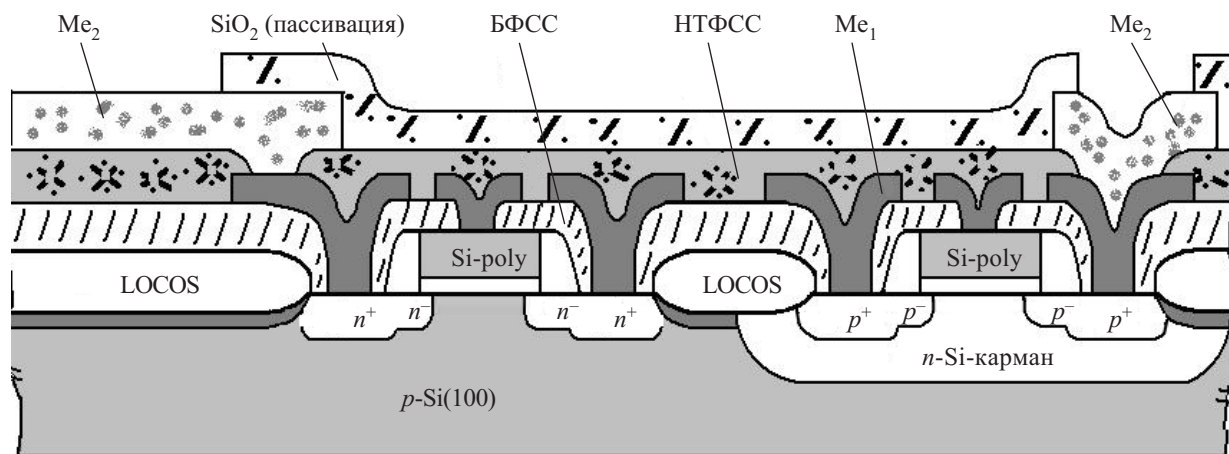


Рис. 6. Сечение структуры СБИС:

БФСС — бор-фосфор-силикатное стекло; НТФСС — низкотемпературное фосфор-силикатное стекло

ные области p^+ -типа; затворы и проводники из поликремния; области под ионное легирование истоков-стоков n^+ -типа; области под ионное легирование истоков-стоков p^+ -типа; контакты-1; металл-1; контакты-2; металл-2; пассивация.

Первым уровнем металла Me_1 (см. рис. 6) производилась разводка соединений между узлами и элементами, которые обеспечивают обработку полученного извне сигнала в виде потока электронов, а второй уровень металла Me_2 использовался для формирования матрицы электродов, на которую падает пучок электронов, и для соединения усилителей со входами счетчиков. Минимальные размеры в схеме: длина канала транзистора по затвору — 2,4 мкм, размер контактного окна по первому уровню металла — 1,5×1,5 мкм. Транзисторы выполнены со слаболегированными стоком и истоком.

Таким образом, создана СБИС, использование которой в МКЧД лазерного масс-спектрометра с удлиненной фокальной плоскостью анализатора позволяет одновременно получать информацию обо всех

элементах, входящих в состав материала, значительно снизить массу, габариты и потребляемую энергию детектора, уменьшить время анализа и затраты исследуемого материала.

Кроме того, разработанная СБИС может быть использована и в других приборах, предназначенных для регистрации профилей и пространственного положения пучков нейтральных и заряженных частиц и направленных потоков фотонов, применяющих в качестве вторичных преобразователей цифровые микроэлектронные позиционно-чувствительные регистраторы пространственного положения и интенсивности электронных пучков.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Langstaff, D. P., Bushell A., Chase, T., Evans, D. A. A fully integrated multi-channel detector for electron spectroscopy // Nuclear Instruments and Methods B.— 2005.— August.— P. 219—223.
2. Борискин А. И., Еременко В. М., Мордик С. Н. и др. Исследование ионно-оптических характеристик лазерного масс-спектрометра с координатно-чувствительным микроэлектронным детектором // Журнал технической физики.— 2008.— Т. 78, № 7.— С. 111—117.

НОВЫЕ КНИГИ

Флуктуации и шумы в сложных системах живой и неживой природы / Под ред. Р. М. Юльметьева, А. В. Мокшина, С. А. Дёмина, М. Х. Салахова.— Казань: Изд-во Министерства образования и науки РТ, Редакционно-издательский центр «Школа», 2008.— 456 с.

Книга представляет собой сборник оригинальных работ известных российских специалистов, посвященных проблемам изучения фундаментальной роли флуктуаций и шумов в поведении сложных систем живой и неживой природы, а также их возможным приложениям в физиологии, медицине, нейрофизиологии, радиофизике и функциональной электронике, сейсмологии, астрофизике и других областях современного естествознания. Книга представляет собой коллективную монографию, написанную ведущими специалистами в данной области. Предназначена для широкого круга специалистов по фундаментальным и прикладным вопросам исследования флуктуаций и шумов и их возможным приложениям в большом круге явлений современной физики и естествознания. Книга содержит результаты последних исследований, а также работы обзорного характера. Одна из основных целей данного издания состоит в привлечении студентов, аспирантов и молодых ученых к увлекательному направлению исследовательской деятельности в новой, интенсивно развивающейся области физики.

Содержание:

1. В. В. Учайкин «Вселенная как фрактальная пыль: флуктуации и корреляции».
2. В. С. Анищенко, Т. Е. Вадивасова, Г. Е. Стрелкова «Влияние шума на хаотические системы».
3. Р. М. Юльметьев, П. Ханги «Механизмы формирования долговременных корреляций в сложных системах за счет статистических эффектов памяти».
4. С. Ф. Тимашев «Фликкер-шумовая спектроскопия как общий феноменологический подход к извлечению информации из хаотических сигналов».
5. Р. Р. Нигматуллин «Что такое КУМ'а (количественная универсальная метка) и с чем ее едят?»
6. В. В. Розанов, О. В. Руденко, Н. Н. Сысоев «Сложные задачи нелинейной акустики и гемодинамики».
7. А. В. Мокшин «Процессы структурного упорядочения в металлических стеклах: влияние сдвигового воздействия».
8. А. А. Потапов «Фрактальные методы исследования флуктуаций сигналов и динамических систем в пространстве дробной размерности».
9. В. В. Афанасьев, С. С. Логинов «Диагностика электронных динамических систем на основе негармонических дробно-степенных спектров».
10. В. В. Афанасьев, В. П. Данилаев, Ю. Е. Польский «Обобщенные многомодовые модели в анализе и диагностике фрактальных структур, живых и неживых динамических систем».
11. Г. В. Грушевская, Г. Г. Крылов «Биологически мотивированные нейросети из хаотических осцилляторов».
12. А. Н. Чувыров «Фазовые волны в нематических жидких кристаллах: следствие самоорганизации гидродинамической флуктуации».
13. Н. Г. Мигранов, Р. Н. Мигранова «Кооперативные явления в открытых системах: функциональный подход».
14. Г. В. Встовский «Выявление пространственных и временных иерархических структур в сложных системах».



Д. т. н. З. Ю. ГОТРА, Д. Т. ДЯЧОК

Украина, НУ «Львовская политехника»,

Львовский научно-исследовательский радиотехнический институт
E-mail: smerklo@lreri.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
30.12.2008 г.

Оппонент к. т. н. В. П. ПОПОВ
(НИИ микроприборов, г. Киев)

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СПОСОБА СОЕДИНЕНИЯ СТОЛБИКОВЫХ ВЫВОДОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА ИХ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Представлены методика и результаты определения электрического сопротивления составных частей жесткого столбикового вывода для разных способов соединения.

Микроконтактные соединения (МКС) принадлежат к ответственным элементам конструкции интегральной схемы, поскольку от них зависит наличие электрической (сигнальной) связи между микросхемой и внешними цепями. При увеличении степени интеграции ИС количество МКС значительно увеличивается. В [1] предполагается, что для аппаратуры категории Harsh (РЭА повышенной стойкости или специального применения) в период 2006—2010 гг. максимальное число выводов корпусов увеличится с 408 до 642, а площадь кристалла возрастет со 100 до 150 мм². Для вычислительной техники число выводов корпусов микросхем возрастает до нескольких тысяч. Значительное увеличение количества МКС приводит к увеличению их общего электрического сопротивления и к удлинению пути прохождения сигналов, что, в свою очередь, вызывает задержку сигналов и увеличивает потери электрической энергии. Поэтому анализ составляющих электрического сопротивления и количественное определение их вклада в суммарное сопротивление микроконтактного узла интегральной схемы является актуальной задачей.

Столбиковые (шариковые) выводы применяются в современных ИС при монтаже бескорпусных полупроводниковых элементов, а также элементов в различных корпусах типа Intel® Stacked-CSP, BGA и др. [2, 3]. В настоящее время для монтажа большинства микросхем с перевернутым кристаллом используют сферические капли припоя, которые компенсируют механические напряжения, вызываемые тепловым или механическим воздействием на кристалл, а также золотые столбиковые выводы, сформированные гальваническим методом. При этом контакт с площадками подложки ГИС обеспечивается ультразвуковым или термокомпрессионным способом и с помощью электропроводящего клея [4]. Реже применяются конструкции жесткого микроконтактного соединения (ЖМКС) с медным, алюминиевым и др. выводом, который может быть различной формы — шара, цилиндра, трапеции и пр. Соединение на основе жестких выводов характеризуется электрическим сопро-

тивлением, уровнем шумов, прочностью соединения. Главным требованием, предъявляемым к ЖМКС, является создание надежного контакта соединяемых элементов (т. е. контактных площадок кристалла и подложки ГИС) при обеспечении низкого электрического сопротивления всего соединения. Таким образом, электрическое сопротивление входит в число важнейших параметров ЖМКС.

Микроконтактное соединение или контактный узел гибридной интегральной схемы состоит, как правило, из двух металлических пленок, например контактных площадок кристалла и подложки, и промежуточного звена, присоединяющего прибор к внешним цепям [5, с. 38]. Такая конструкция ЖМКС, предложенная в [6], показана на рис. 1. Промежуточным звеном здесь служит столбиковый вывод. Для исследования выбрана прямоугольная форма вывода, поскольку в этом случае математические выражения, описывающие общее электрическое сопротивление ЖМКС, удобно выводить аналитическим путем.

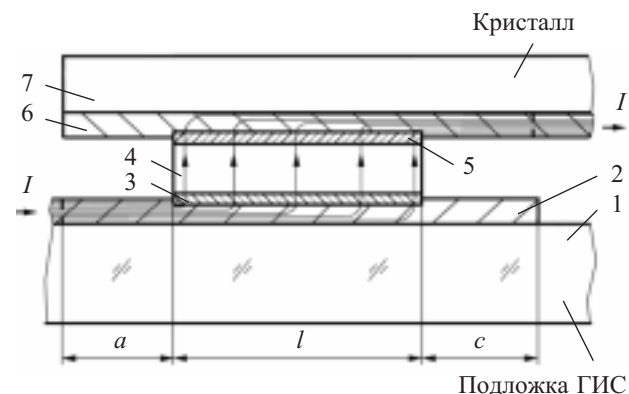


Рис. 1. Модель жесткого контактного соединения:
a — длина предвыводной части контактной площадки; l — длина подвыводной части; c — длина послеыводной части (диэлектрические, адгезионные и защитные слои не показаны); I — протекающий сквозь вывод ток

Модель состоит из контактной площадки 2, нанесенной на подложку 1 ГИС, вывода 4, переходной зоны 3 между контактной площадкой ГИС и выводом, контактной площадки 6, нанесенной на полупроводниковый элемент (кристалл) 7, и переходной зоны 5 между выводом и контактной площадкой полупроводникового элемента. В модели принято, что контактная площадка 6 лежит на диэлектрическом

слое, например двуокиси кремния, который на рисунке не показан. Исходя из сказанного, выражение для суммарного контактного сопротивления столбикового вывода запишем в виде

$$R_{\text{кв}} = R_{\text{кп1}} + R_{\text{пз1}} + R_{\text{в}} + R_{\text{пз2}} + R_{\text{кп2}}, \quad (1)$$

где $R_{\text{кп1}}$ — сопротивление контактной площадки подложки ГИС;
 $R_{\text{пз1}}$ — сопротивление переходной зоны между контактной площадкой подложки и выводом;
 $R_{\text{в}}$ — сопротивление столбика-вывода;
 $R_{\text{пз2}}$ — сопротивление переходной зоны между контактной площадкой кристалла и выводом;
 $R_{\text{кп2}}$ — сопротивление контактной площадки кристалла.

В данном исследовании размеры контактных площадок кристалла и подложки ГИС приняты одинаковыми. Сопротивление контактной площадки представим в виде суммы двух составляющих (рис. 1):

$$R_{\text{кпл}} = R_{\text{кп1}} + R_{\text{кп2}}, \quad (2)$$

где $R_{\text{кп1}}$ — сопротивление предвыводной (по направлению тока) части контактной площадки длиной a ;
 $R_{\text{кп2}}$ — сопротивление подвыводной части контактной площадки длиной l .

Экспериментально установлено, что послеыводная часть контактной площадки длиной c не влияет существенно на ее сопротивление.

Составляющая сопротивления $R_{\text{кп1}}$ определяется по формуле

$$R_{\text{кп1}} = \rho_2 a / (bt), \quad (3)$$

где ρ_2 — удельное сопротивление контактной площадки;
 t и b — соответственно толщина и ширина контактной площадки.

Вследствие неравномерности распределения силовых линий тока в подвыводной части контактной площадки расчет составляющей электрического сопротивления $R_{\text{кп2}}$ представляет определенные трудности. Поскольку полупроводниковый кристалл перевернут, и его контактные площадки находятся внутри конструкции, то при измерении сопротивления жестких контактных выводов возникают проблемы, связанные с подсоединением измерительных зондов. Поэтому, чтобы определить сопротивление контактных площадок, а также переходных зон, используем результаты исследования модели нахлесточного микроконтактного соединения проволоки и пленки [7]. Сопротивление контактных площадок одного размера и из одинакового материала при подобии формы и при равенстве площади контактирования как для проволочного, так и для столбикового выводов будут одинаковыми. Методика расчета следующая.

Сопротивление микропроволочного соединения, площадь которого равна площади контакта столбикового вывода, определяется по заданному удельному переходному контактному сопротивлению $\rho_{\text{п}}$ [7] для данной контактной пары по формуле

$$R_{\text{к}} = \frac{r_1^2 + r_2^2}{(r_1 + r_2)\alpha \operatorname{th}(\alpha l)} + \frac{2r_1 r_2}{(r_1 + r_2)\alpha \operatorname{sh}(\alpha l)} + \frac{r_1 r_2 l}{r_1 + r_2}, \quad (4)$$

$$\text{где } \alpha = \sqrt{y(r_1 + r_2)}; \quad (5)$$

$$r_1 = \rho_1 / (Bh); \quad (6)$$

$$r_2 = \rho_2 / (bt); \quad (7)$$

$$y = B/\rho_{\text{п}}; \quad (8)$$

$R_{\text{к}}$ — сопротивление микроконтактного соединения проволоки и подвыводной части контактной площадки;

ρ_1 — удельное сопротивление микропроволоки;
 h, B — соответственно толщина и ширина деформированной части проволоки;

y — погонная проводимость условного переходного слоя.

Переходное контактное сопротивление $R_{\text{кп}}$ рассчитывается по формуле [7]

$$R_{\text{кп}} = \frac{\rho_{\text{п}}}{Bl} = \frac{1}{yl}, \quad (9)$$

где l — длина деформированной части проволоки.

Суммарное сопротивление подвыводной части контактной площадки и деформированной части проволоки определяется по формуле

$$R_{\text{кпл}} = R_{\text{к}} - R_{\text{кп}}. \quad (10)$$

Рассчитывается соотношение погонных сопротивлений r_1 и r_2 . Приняв отношение самих сопротивлений равным отношению r_1/r_2 , из суммарного $R_{\text{кпл}}$ определим сопротивление подвыводной части контактной площадки:

$$R_{\text{кп2}} = R_{\text{кпл}} / (1 + r_1 / r_2). \quad (11)$$

Сопротивление столбикового вывода, который имеет со своей контактной площадкой такую же по величине и форме площадь контактирования, принимаем равным рассчитанному сопротивлению подвыводной части контактной площадки.

Тогда, согласно (2), полное сопротивление контактной площадки

$$R_{\text{кпл}} = \frac{\rho_2 a}{bt} + \frac{R_{\text{кпл}}}{1 + r_1 / r_2}. \quad (12)$$

Для определения сопротивления многослойных контактных площадок используем их приведенные удельные сопротивления. Сопротивление переходных зон между контактной площадкой и выводом при твердофазной сварке определяется по формуле

$$R_{\text{пз}} = \rho_{\text{п}} / F, \quad (13)$$

где F — площадь контактирования, которая равна площади поперечного сечения столбикового вывода.

Сопротивление переходных зон между контактной площадкой и выводом при соединении припоем определяется по формуле

$$R_{\text{пз}} = \rho_{\text{пз}} t_{\text{пз}} / F, \quad (14)$$

где $\rho_{\text{пз}}$ — удельное сопротивление переходной зоны;
 $t_{\text{пз}}$ — толщина переходной припойной зоны.

При клеевом соединении учтем, что переходную зону 3 (рис. 1) заменит прослойка клея между контактной площадкой подложки и выводом. Сопротивление клеевой прослойки определяется по формуле

$$R_{\text{кк}} = \rho_{\text{к}} t_{\text{кк}} / F, \quad (15)$$

где $\rho_{\text{к}}$ — удельное сопротивление клея;
 $t_{\text{кк}}$ — толщина клеевого слоя.

Таблица 1

Вклад сопротивления составляющих элементов в общее сопротивление сварного ЖМКС

Элементы сварного ЖМКС	I вариант ЖМКС, $R_{\text{КСВ}}=59,4$ мОм		II вариант ЖМКС, $R_{\text{КСВ}}=104,2$ мОм		Примечание
	Сопротивление, мОм	Доля в общем сопротивлении, %	Сопротивление, мОм	Доля в общем сопротивлении, %	
Контактная площадка ГИС	11,6	11,1	3,1	5,2	ширина площадки 0,2 мм
Переходная зона 3 (рис. 1)	76,0	72,9	39,7	66,9	
Золотой столбик-вывод	0,2	0,2	0,2	0,3	
Переходная зона 5 (рис. 1)	0,2	0,2	0,2	0,3	
Al-Ni-Au-контактная площадка кристалла	16,2	15,6	16,2	27,3	ширина площадки 0,2 мм

Сопротивление столбика-вывода определяется по формуле

$$R_{\text{в}} = \rho_{\text{в}} h_1 / F, \quad (16)$$

где $\rho_{\text{в}}$ — удельное сопротивление вывода;
 h_1 — высота вывода.

Размеры столбиковых выводов могут быть различными — от десятков до нескольких сотен микрометров. В исследовании было принято $h=0,1$ мм и $F=1 \cdot 10^{-2}$ мм². Удельное переходное контактное сопротивление $\rho_{\text{п}}$ сварного соединения контактной площадки ГИС из полированного слоя пасты 3713 и Аупроволоки (первый вариант соединения) равно $3,97 \cdot 10^{-6}$ Ом·см², а Al-контактной площадки и Аупроволоки (второй вариант) — $7,6 \cdot 10^{-6}$ Ом·см². Будем считать, что толщина зон взаимопроникновения материала вывода и пленочных проводников значительно меньше толщины самих проводников. В табл. 1 приведены результаты расчета входящих в формулу (1) составляющих для двух вариантов сварного ЖМКС.

Как видно из табл. 1, при соединении твердофазной сваркой разнородных материалов, наибольшее влияние на сопротивление ЖМКС оказывает сопротивление переходной сварной зоны между столбиком-выводом и контактной площадкой ГИС, а также сопротивление контактных площадок. Сопротивление же самого золотого столбика-вывода сравнительно незначительно, поэтому некоторое изменение формы вывода по высоте, которое встречается на практике, будет мало влиять на общее сопротивление ЖМКС. Переходное сопротивление гальванически осажденного вывода в зоне 5 (рис. 1) также незначительно. На рис. 2 показаны рассчитанные по формулам (3),

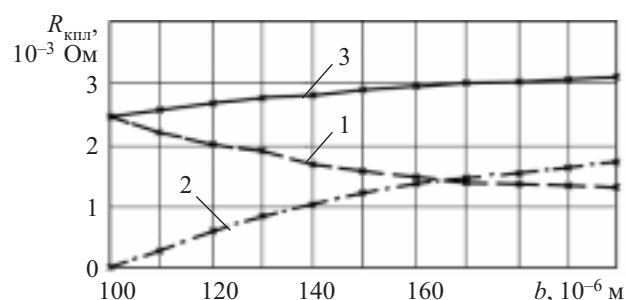


Рис. 2. Зависимость сопротивления контактной площадки из пасты 3713 от ее размера при толщине 8 мкм для сварного МКС:

1 — сопротивление предвыводной части контактной площадки $R_{\text{кп1}}$; 2 — сопротивление подвыводной части контактной площадки $R_{\text{кп2}}$; 3 — суммарное сопротивление контактной площадки $R_{\text{кпл}}$

(11) и (12) зависимости сопротивления полированной контактной площадки ГИС из пасты 3713 от ее размера для золотого столбикового вывода с поперечным сечением $0,1 \times 0,1$ мм.

Результаты определения сопротивления припойного ЖМКС сведены в табл. 2. Поскольку припойный вывод полностью заполняет контактную площадку, составляющая сопротивления $R_{\text{кп1}}$ в данном случае отсутствует, и сопротивление контактной площадки полностью определяется составляющей $R_{\text{кп2}}$. В расчете принято, что удельное сопротивление переходных зон 3 и 5 (рис. 1) равно $1,12$ мОм·м, а их толщина — $0,2$ мкм. Из табл. 2 видно, что наибольший вклад в общее сопротивление припойного ЖМКС вносят контактные площадки.

При использовании клеевого соединения столбиковые выводы на полупроводниковом элементе фор-

Таблица 2

Вклад сопротивления элементов припойного ЖМКС в общее сопротивление, равное $18,95$ мОм

Элементы припойного ЖМКС	Сопротивление, мОм	Доля в общем сопротивлении, %	Примечание
Контактная площадка ГИС	5,8	30,60	Ширина площадки 0,2 мм
Переходная зона 3 (рис. 1)	0,006	0,03	
Припойный столбик-вывод	0,64	3,38	
Переходная зона 5 (рис. 1)	0,006	0,03	
Контактная площадка кристалла	12,5	65,96	Ширина площадки 0,2 мм

Вклад сопротивления составных элементов клеевого ЖМКС в общее сопротивление

Элементы клеевого ЖМКС	Сопротивление, мОм	Доля в общем сопротивлении, %	Примечание
Контактная площадка ГИС	3,1	6,2...14,0	Ширина площадки 0,2 мм
Клеевой слой (вместо зоны 3, рис. 1)	2,5 ...30,0	11,2...60,4	
Золотой столбик-вывод	0,2	0,4...0,9	
Переходная зона 5 (рис. 1)	0,2	0,4...0,9	
Контактная площадка кристалла	16,2	32,6...73,0	Ширина площадки 0,2 мм
Суммарное сопротивление клеевого ЖМКС	22,2...49,7	100	

мируют с помощью термокомпрессии и ультразвука [8] и гальваническим методом [4]. Рассчитанное сопротивление ЖМКС для сформированного гальваническим методом золотого столбикового вывода на алюминиевой контактной площадке (с промежуточным никелевым и защитным золотым слоем) элемента и его клеевого соединения с контактной площадкой подложки ГИС из пасты 3713 приведены в табл. 3. В расчете принято, что толщина клеевой прослойки 5—60 мкм, а ее удельное сопротивление — $5 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. Для уменьшения сопротивления клеевого ЖМКС необходимо, по возможности, уменьшать размер контактной площадки в направлении протекания тока или увеличивать ее толщину, применять клеи с возможно меньшим удельным сопротивлением, а также уменьшать толщину клеевой прослойки.

Рассчитанные значения сопротивления столбиковых выводов согласуются с данными [4] для случаев припойного оплавления и приклеивания. Поскольку методика расчета в этой работе не приведена, то предложенная нами методика расчета рекомендована для практического определения сопротивления ЖМКС при проектировании ГИС.

Таким образом, разработаны модель жесткого микроконтактного соединения ГИС и методика определения его сопротивления, в которой учитывается неравномерность распределения тока вдоль контакта и которая обеспечивает определение сопротивления его составных частей. Результаты работы рекомендуется использовать при проектировании полупроводниковых приборов и микросхем со столбиковыми

(шариковыми) выводами для оценки влияния электрического сопротивления микроконтактных узлов и их составных частей на параметры приборов и интегральных схем.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Грабов А. Стратегия развития технологии металлокерамических корпусов для компонентов высоконадежной РЭА // Chip News Украина. Инженерная микроэлектроника.— 2008.— № 3 (73).— С. 74—77.
2. Мельниченко А. Технология создания массива выводов на кремниевой пластине // Электронные компоненты и системы.— 2006.— № 6.— С. 47—49.
3. Новости технологии.— 10 сентября 2007.— Компания Palomar на выставке SEMICON Taiwan 2007 представит автоматическое выполнение золотых столбиковых выводов / http://www.elinform.ru/news_123.htm.
4. Мельниченко А. Технология миниатюризации электронных устройств // Электронные компоненты и системы.— 2004.— № 1.— С. 43—45.
5. Мазур А. И., Алехин В. П., Шоршоров М. Х. Процессы сварки и пайки в производстве полупроводниковых приборов.— М.: Радио и связь, 1981.
6. Дячок Д. Т., Майстришин Р. М. Оцінка електричного опору стовпчикового виводу ІС на його моделі // Тези доп. 11-ї відкр. наук.-техн. конф. проф.-виклад. складу Інституту ТРЕТ НУ «Львів. політехніка» з проблем електроніки.— 2008.— Львів.— С. 24.
7. Дячок Д. Т., Смеркло Л. М., Незоров В. В. Взаємозв'язок конструктивних параметрів і електричного опору мікроконтактного з'єднання в ІС // Вісник Нац.університету «Львівська політехніка». Сер. Елементи теорії та прилади твердотільної електроніки.— 2006.— № 569.— С. 12—16.
8. Мельниченко А. Перспективы развития методов сборки микросхем / Электронные компоненты и системы.— 2004.— № 4.— С. 38—41.

НОВЫЕ КНИГИ

Применение высокоскоростных систем / Под ред. Уолта Кестера.— М.: Техносфера, 2009.— 368 с.

В книге рассмотрен метод высокоскоростного преобразования данных. В разделе 1 приведены архитектуры ЦАП и области их применения, а также оценочные комплекты АЦП и средство моделирования ADIsimADC®. Раздел 2 посвящен методам оптимизации интерфейсов преобразователей данных с помощью дифференциальных усилителей, трансформаторов и т. д. В разделе 3 рассмотрены ЦАП, оценочные аппаратные и программные средства ЦАП, программа их разработки и моделирования. В разделе 4 приведены сведения о топологии печатных плат. Подробно описываются программы разработки высокоскоростных систем.



К. ф.-м. н. Р. Г. ЧЕРКЕЗ

Украина, Черновицкий национальный университет
имени Юрия Федьковича
E-mail: radionch@mail.ru

Дата поступления в редакцию
26.01 2009 г.

Оппонент д. т. н. А. Л. ВАЙНЕР
(НИИ «Штурм», г. Одесса)

СИСТЕМА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА НА ОСНОВЕ ПРОНИЦАЕМЫХ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ

Компьютерные исследования предлагаемой системы показали возможность повышения холодильного коэффициента в 1,6—1,7 раз и холодопроизводительности на 40% по сравнению с традиционными термоэлектрическими системами.

Термоэлектрические системы охлаждения характеризуются безвредностью для окружающей среды (отсутствием фреона), простотой конструкции, бесшумностью, высокой надежностью, возможностью произвольной ориентации в пространстве, позволяют плавно и точно регулировать холодопроизводительность и температурный режим, что делает их перспективными для обеспечения тепловых режимов кондиционирования воздуха. Однако, несмотря на такие привлекательные характеристики, они не нашли широкого применения при решении задач термостабилизации воздуха из-за меньших значений холодильного коэффициента по сравнению с компрессионными устройствами.

Принципиально важные шаги в повышении эффективности термоэлектрических преобразователей энергии были сделаны школой А. Ф. Иоффе, когда впервые было показано, что эффективность термоэлектрического преобразования энергии определяется добротностью материала $Z = \alpha^2 \sigma / k$ (α — термо-эдс, σ — электропроводность, k — теплопроводность), и было предложено использовать в термоэлектричестве полупроводники [1]. Это позволило определить основные методы повышения эффективности: легирование материала активными примесями для достижения максимальных значений $\alpha^2 \sigma$ и легирование материала изовалентными примесями замещения для снижения теплопроводности. Эти методы были применены к ряду материалов, что дало существенное возрастание добротности Z и способствовало широкому применению термоэлектрических преобразователей энергии для решения задач обеспечения необходимых тепловых режимов.

Однако в последнее десятилетие, несмотря на многочисленные исследования, не удалось добиться значительного роста добротности материалов, поэтому возникла необходимость поиска новых путей повышения эффективности термоэлектрических систем.

Перспективными в этом отношении являются проницаемые термоэлектрические системы, у которых

теплообмен происходит не только через поверхности спаев, но и через объем веток. Одним из первых на возможность повышения эффективности термоэлектрического преобразования энергии путем применения проницаемых термоэлементов указал в своем авторском свидетельстве И. В. Зорин [2]. В последнее время интенсивные исследования в этом направлении ведутся и за рубежом (Японии, США и др.).

В таких термоэлементах привлекательным с точки зрения кондиционирования является возникновение эффекта Джоуля–Томсона при дросселировании воздуха через проницаемый материал [3]. Использование этого эффекта совместно с термоэлектрическими может повысить термодинамическую эффективность термоэлектрического кондиционирования и улучшить качество обеспечения тепловых режимов работы объекта термостатирования.

На рис. 1 приведена схема термостатирующего блока термоэлектрического кондиционера на основе проницаемых термоэлементов [4]. Поток воздуха 1 для термостатирования подается вентилятором 2 по патрубку 4 через фильтр очистки 10 и горячий теплообменник 5 на блок проницаемых термоэлементов 3.

Пропускание электрического тока соответствующей полярности через термоэлемент приводит к охлаждению его нижних граней. Воздух, проходя по каналам термоэлементов в направлении холодных спаев, отдает тепло материалу веток, охлаждается и выходит через патрубок 11. Тепло с «горячих» граней термоэлементов отводится в теплообменнике 5 при помощи теплоносителя, который циркулирует по патрубку 6. Патрубок 8 и заслонка 7 с вентилятором 9 служат для забора воздуха из окружающей среды, который отводит тепло от теплоносителя.

Основным элементом блока является батарея из проницаемых термоэлементов 3, характеристики которой определяют энергетическую эффективность устройства.

Проницаемый термоэлемент состоит из ветвей n - и p -типов проводимости, свойства материала которых зависят от температуры.

Изменение температуры воздуха dt вследствие эффекта Джоуля–Томсона описывается соотношением

$$dt = \alpha_i dp, \quad (1)$$

где α_i — коэффициент Джоуля–Томсона;
 dp — изменение давления.

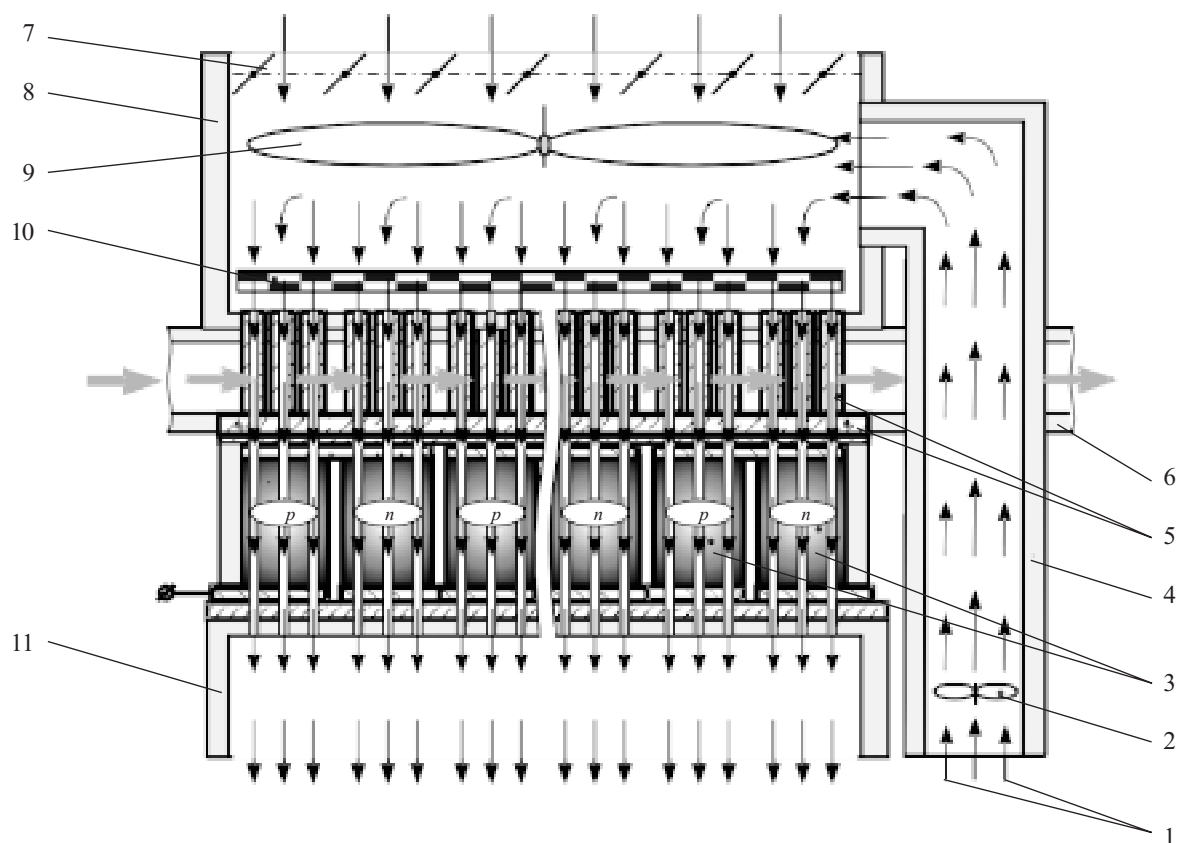


Рис. 1. Термостатирующий блок термоэлектрического кондиционера

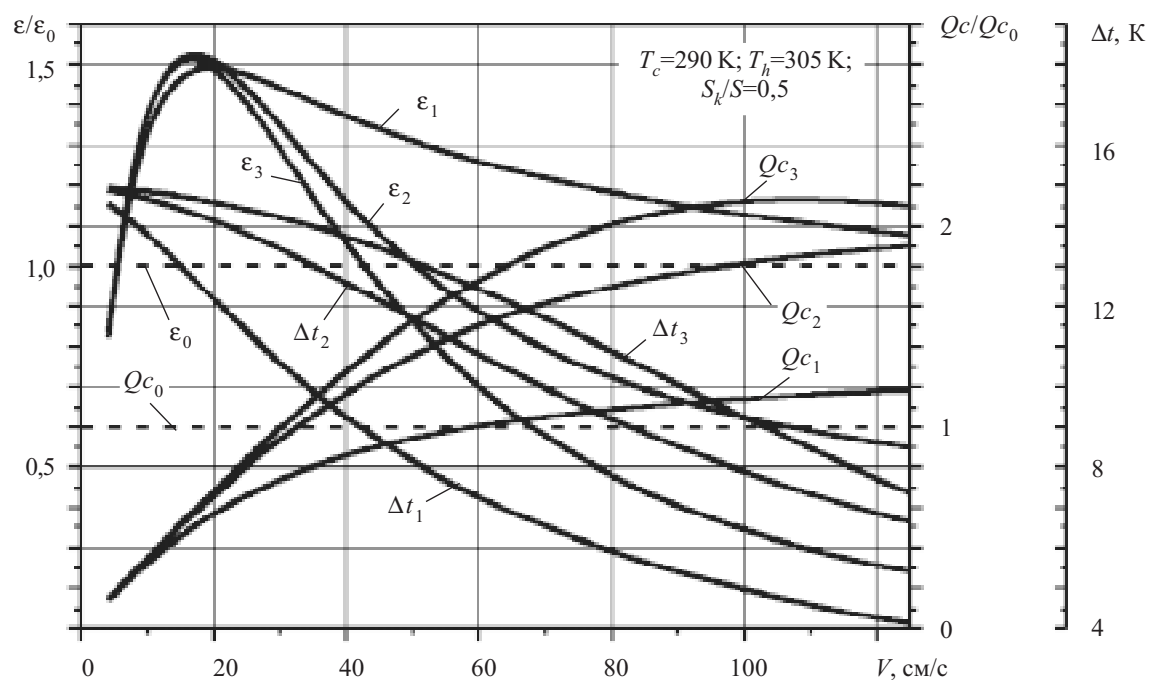


Рис. 2. Зависимость холодильного коэффициента ϵ , холодопроизводительности Q_c и разность температур охлаждаемого воздуха на входе и выходе Δt от скорости воздуха в каналах проницаемых термоэлементов с различным эффективным диаметром каналов:
индекс 1 — 0,1; 2 — 0,05; 3 — 0,033 см (ϵ_0, Q_0 — параметры традиционных термоэлементов)

Стационарное распределение температуры в термоэлектрическом материале веток $T(x)$ и в воздухе $t(x)$ можно найти из решения системы дифференциальных уравнений [5], которая должна быть записана для ветвей n - и p -типов проводимости, с учетом эффекта Джоуля–Томсона:

$$\begin{cases} \frac{dq}{dx} = \frac{\alpha^2 j}{k} T + \frac{\alpha j}{k} q + j\rho - \frac{\alpha_\tau P_\kappa N_\kappa l^2}{(S - S_\kappa) j} (T - t); \\ \frac{dT}{dx} = -\frac{\alpha j}{k} T - \frac{j}{k} q; \\ \frac{dt}{dx} = \frac{\alpha_\tau P_\kappa N_\kappa l}{Vc_p S_\kappa} (T - t) - \alpha_i l \frac{dp}{dx}, \end{cases} \quad (2)$$

$$q = \frac{1}{j} \left(\alpha(T, \xi(x)) jT - k(T, \xi(x)) \frac{dT}{dx} \right),$$

где q — удельный тепловой поток;
 x — безразмерная координата;
 $j = il$;
 l — высота ветвей термоэлемента;
 i — плотность электрического тока;
 ρ — удельное электрическое сопротивление;
 P_κ — периметр канала;
 S — площадь сечения ветви с каналами;
 S_κ — суммарная площадь сечения всех каналов;
 α_τ — коэффициент теплоотдачи;
 N_κ — число каналов;
 $V = v\rho_g$;
 v — скорость воздуха в каналах;
 ρ_g — плотность воздуха;
 c_p — теплоемкость теплоносителя.

Изменение давления воздуха вдоль направления его движения определим на основе соотношения Дарси–Вейсбаха

$$\frac{dp}{dx} = \xi_d \frac{\pi V^2}{2P_\kappa \rho_g}, \quad (3)$$

где ξ_d — коэффициент трения.

Задача поиска максимальной энергетической эффективности сводится к поиску максимума холодильного коэффициента

$$\varepsilon = \frac{Q_c}{W} = \frac{Q_c}{Q_h - Q_c + W_{pr}} \quad (4)$$

при дифференциальных ограничениях (2), (3) и граничных условиях для ветвей n - и p -типов проводимости:

$$T_{n,p}(0) = T_h, \quad T_{n,p}(l) = T_c, \quad t_{n,p}(0) = T_a, \quad (5)$$

где $Q_c = Q_n(1) + Q_p(1) + Q_L$;
 $Q_h = Q_n(0) + Q_p(0)$;
 $Q_L = \sum_{n,p} Vc_p S_R (t(0) - t(1))$;
 Q_h, Q_c — тепловые потоки, которыми термоэлемент обменивается с внешними источниками тепла;
 $Q(1), Q(0)$ — тепловые потоки на холодных и на теплых спаев ветвей термоэлемента, соответственно;
 Q_L — тепло, отводимое от воздуха;
 $t(0), t(1)$ — температура воздуха на входе и на выходе из ветвей термоэлемента, соответственно;
 W_{pr} — мощность, затрачиваемая на прокачку воздуха;

T_h, T_c — значения температуры теплых и холодных спаев термоэлемента, соответственно;
 T_a — температура воздуха на входе в термоэлемент.

Для решения задачи использована математическая теория оптимального управления. На основе системы дифференциальных уравнений (2) с учетом связей (5), необходимых условий оптимальности, вытекающих из принципа максимума Понтрягина [6] и численных методов, была создана компьютерная программа по определению оптимальных параметров, при которых холодильный коэффициент будет максимальным.

Приведем результаты компьютерных исследований проницаемого термоэлемента с ветвями из материалов на основе Bi_2Te_3 , параметры которого зависят от температуры [7].

Зависимости характеристик проницаемого термоэлемента от скорости воздуха в каналах в условиях оптимальной плотности тока питания показаны на рис. 2. Видно, что холодильный коэффициент максимален в области $V=20$ см/с, выше которой он уменьшается и далее становится меньше, чем у традиционных непроницаемых термоэлементов (ε_0). Несколько иначе ведет себя холодопроизводительность — при малых скоростях воздуха (до 30 см/с) она ниже, чем у традиционных термоэлементов (Q_{c0}), а при больших скоростях — выше. Так, например, для эффективного диаметра каналов 0,05 см при скорости воздуха 50 см/с значения холодильного коэффициента систем с проницаемыми и традиционными термоэлементами одинаковы, а холодопроизводительность первых на 40% больше, чем вторых.

Также расчеты показали, что рациональное использование термоэлектрических эффектов в сочетании с эффектом Джоуля–Томсона дает возможность повысить холодильный коэффициент систем с проницаемыми термоэлементами на 60—70% по сравнению с непроницаемыми. В данных системах, в условиях невысокого перепада давления воздуха на термоэлементе, вклад эффекта Джоуля–Томсона составляет 6—10%. Для его увеличения можно повысить перепад давления за счет использования, например, пористых проницаемых термоэлектрических материалов.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования проницаемых термоэлементов для создания систем кондиционирования воздуха и эффективного обеспечения тепловых режимов объекта термостатирования на основе.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Иоффе А. Ф. Полупроводниковые термоэлементы. — М.: Из-во АН СССР, 1960.
2. А. с. СССР 144883. Способ повышения к.п.д. термоэлектрического генератора (холодильника) / Зорин И. В. — Опубл. 18.10.1968. (Заявл. 24.06.1961).
3. Пат. 21944 Украины. Термоэлемент / Л. И. Ананичук, Р. Г. Черкез. — 10.04.2007.
4. Пат. 30827 Украины. Термостатующий блок кондиционера / Р. Г. Черкез. — 11.03.2008.
5. Ананичук Л. И., Вихор Л. М., Черкез Р. Г. Оптимальне керування неоднорідністю напівпровідникового матеріалу для прониклих термоелементів охолодження // Термоелектрика. — 2000. — № 3. — С. 46—57.
6. Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов. — М.: Наука, 1976.
7. Вайнер А. Л. Термоэлектрические охладители. — М.: Радио и связь, 1983.

Л. Б. ДЖАНГИДЗЕ, к. ф.-м. н. А. Н. ТАВХЕЛИДЗЕ,
Ю. М. БЛАГИДЗЕ, З. И. ТАЛИАШВИЛИ

Грузия, Тбилисский государственный университет
E-mail: avtotav@geo.net.ge

Дата поступления в редакцию
18.09 2008 г.

Оппонент д. х. н. В. Н. ТОМАШИК
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЕ КОНФОРМНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТУННЕЛЬНОГО ПЕРЕХОДА С ВАКУУМНЫМ НАНОЗАБОРОМ

Предложены различные технологические приемы, позволяющие получить правильную геометрию электрода в процессе электроосаждения меди и уменьшить внутреннее напряжение осаждаемого слоя.

В последние годы проводятся работы по созданию микрохолодильников на основе квантовомеханического туннелирования электронов. Первое теоретическое исследование охлаждения с помощью туннелирования проводилось для предотвращения перегрева одноэлектронных транзисторов [1]. Типичный туннельный переход «металл—изолятор—металл» имеет высокую удельную теплопроводность вследствие низкой толщины изолятора (3—10 нм). Это приводит к появлению паразитного обратного теплового потока, который уменьшает коэффициент охлаждения.

Туннельный переход «металл—вакуум—металл» лишен этого недостатка, однако он очень сложен с точки зрения практической реализации. В [2] предложен метод получения такого перехода электрохимическим осаждением конформных электродов, при котором образуется вакуумный нанозазор большой площади.

Характеристики холодильников с вакуумным нанозазором изучались теоретически в ряде работ [3—7]. Было показано, что охлаждающая способность перехода «металл—вакуум—металл» составляет примерно 100 Вт/см² [3, 5], однако коэффициент охлаждения таких переходов не превышает 10%. В [6] изучали туннельный переход «металл—вакуум—изолятор—металл» с дополнительным тонким слоем изолятора на коллекторе. Коэффициент охлаждения такого перехода оказался значительно выше, порядка 40—50%, а изоляционный слой предохраняет электроды от короткого замыкания и упрощает их конструкцию. В [8] определена возможность практической реализации конформных электродов электроосаждением меди.

Методы реализации и экспериментальные результаты

В качестве базовых электродов при электролизе были использованы полированные подложки Si(100) *n*-типа диаметром 50, 40 и 20 мм и толщиной 1—

2 мм. На кремниевые пластины осаждались в вакууме тонкие пленки Ti и Ag (Ti—0,1 мкм и Ag—1,2 мкм) со средней адгезией между ними, которая точно регулировалась [9]. Затем при нормальных условиях проводили электроосаждение толстого слоя меди на поверхность серебра.

Толстые слои Cu осаждались в сульфатных электролитах ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$) в термостабилизированной ванне с механическим перемешиванием электролита при плотности тока $i=15$ —50 мА/см². Эти электролиты не сложны по своему составу, устойчивы, легко корректируются и позволяют использовать относительно высокие плотности тока, а выход по току близок к теоретическому значению—100%. Этиловый спирт в некоторой степени предотвращает образование одновалентных ионов меди, способствуя получению мелкокристаллического осадка.

Токовый вывод подсоединялся к Si-пластине с обратной стороны, которая была изолирована от электролита.

Электролиз проводили в температурном диапазоне 23,5—35°C. Стабилизация температуры позволяла не допустить преждевременного расщепления электродов из-за различия в коэффициентах термического расширения кремния пластины и осаждаемого слоя меди. Для этого использовали две ванны. Ванна с электролитом помещалась в ванну с водой. Температура воды поддерживалась нагревателем и была на два градуса меньше, чем температура электролита, которая варьировалась в диапазоне 23,5—35°C и стабилизировалась с точностью до 0,3°C. Исследовалась возможность получения осажденного слоя Cu с однородной поверхностью для создания металлического электрода нужного диаметра и формы. Для обеспечения равномерного распределения Cu по поверхности катода использовались следующие методы:

- защита поверхности катода кольцевыми масками разной формы из электроизоляционного материала;
- установка дополнительных катодов около основного катода;
- вращение катода;
- использование анодов различных размеров;
- использование асимметричного переменного тока.

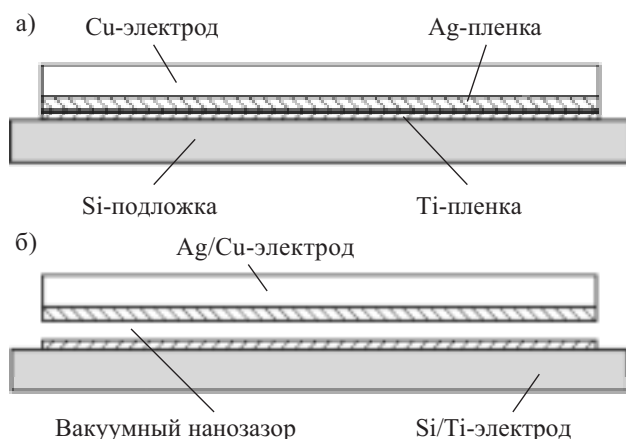


Рис. 1. Многослойный сэндвич Si/Ti/Ag/Cu (а) и конформные электроды, полученные после расщепления сэндвича (б)

На Si-пластинах диаметром 50 и 40 мм осаждался медный электрод диаметром 28 мм. На пластинах диаметром 20 мм выращивались электроды диаметром 12 и 3 мм. Толщина слоя меди составляла 450—750 мкм для электродов диаметром 28 и 12 мм и до 4000 мкм для электрода диаметром 3 мм.

В результате получали «сэндвич» Si/Ti/Ag/Cu (рис. 1, а), который при нагреве или охлаждении разделяется на объемные электроды Si/Ti и Ag/Cu (рис. 1, б) [2] из-за различия коэффициентов термического расширения Si и Cu. Конформность поверхности электродов, сформировавшихся после расщепления (т. е. величину общего изгиба), определяли оптическим методом с помощью интерферометра Майкельсона [10]. На электроде Ag/Cu изгиб определяли со стороны Ag.

В качестве источника излучения служил He-Ne-лазер с длиной волны $\lambda=632,8$ нм. Одно из зеркал интерферометра заменяли зеркальной поверхностью

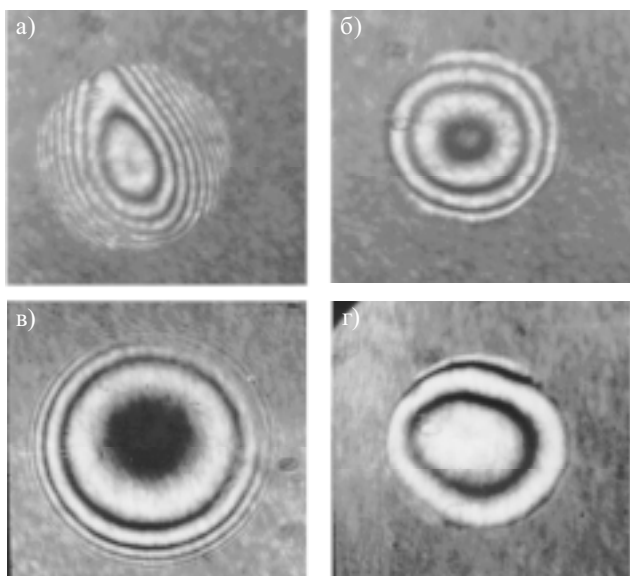


Рис. 2. Интерферограммы поверхности Ag/Cu-электрода (со стороны Ag) (а, б, в) и Si/Ti-электрода (г) после вскрытия сэндвичей, полученных при 35°C: а — без вращения катода; б, в — с вращением катода

электрода Ag/Cu. Интерференционная картина формировалась в воздушном зазоре между одним из зеркал и виртуальным изображением второго зеркала (в нашем случае — образца). Когда зазор был параллельным, получали полосы одинакового наклона (кольца) (рис. 2). После закрепления образца в соответствующем листе интерферометра положение образца регулировали для получения интерференционной картины с наклонными полосами. Подсчитав число колец n , можно вычислить общий изгиб образца по формуле $N=n\lambda/2$. Знак изгиба определялся при легком нажатии на зеркало, находящееся в большом плече интерферометра. Уменьшение количества колец на интерференционной картине означает выпуклость поверхности и, соответственно, увеличение количества колец свидетельствует о ее вогнутости. Для определения приведенного изгиба α металлического электрода использовали формулу $\alpha = \frac{n\lambda/2}{D}$.

$$\alpha = \frac{n\lambda/2}{D}$$

Начальный приведенный изгиб для базового электрода (Si-пластины) с $D=50, 40$ и 20 мм составлял 57, 47 и 16 нм/мм, соответственно. Во время измерений изгиба с помощью интерферометра температуру поддерживали равной температуре осаждения медного электрода.

В первых экспериментах медная поверхность была неровной, с выступающими краями (рис. 3, а). Толщина меди на краях электрода примерно в два раза превышала толщину в его средней части. Расчеты позволяют определить только среднюю толщину поверхности. Экспериментальные данные в [11] показали, что даже на плоских электродах, помещенных на равном расстоянии от анода, плотность тока, а следовательно и толщина покрытия распределяются неравномерно. Плотность тока в углах и по краям электрода значительно превышает расчетную, а в средней его части она ниже. Если два параллельных электрода одинаковой площади поместить в электролит, ток проходит не только вдоль основных силовых линий, перпендикулярных к поверхности электродов, но и вдоль дополнительных силовых линий. Если при поперечном сечении ванны площадь электролита больше, чем площадь электродов, силовые линии концентрируются, в основном, по краям электрода и могут огибать их в зависимости от геометрии электрода и ванны.

Для устранения краевых эффектов во время осаждения слоя меди толщиной 450—750 мкм на

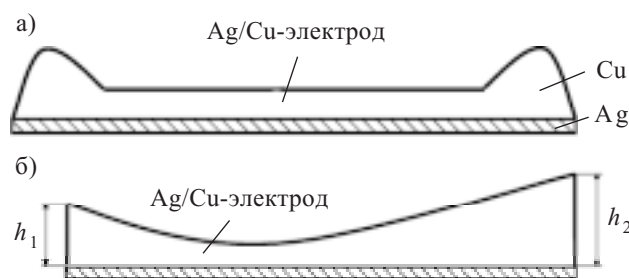


Рис. 3. Электрод Ag/Cu, осажденный без защитной маски (а) и с защитной маской высотой 3 мм (б)

электрод диаметром 28 мм использовали разные защитные маски высотой 3 мм. Медный слой электрода Ag/Cu имел вогнутую поверхность с разной толщиной по краям (рис. 3, б). Толщина медного слоя в нижней части электрода (h_2) всегда была больше, чем в его верхней части (h_1). Средняя разность составляла $\Delta h_{\text{ср}} = 105$ мкм. Поверхность электрода Ag/Cu со стороны Ag имела изгиб цилиндрической формы с $\alpha = 237$ нм/мм.

Для устранения изгиба электрода Ag/Cu диаметр кремниевой пластины уменьшили до 20 мм при неизменной ее толщине (1 мм), а диаметр осаждаемого электрода уменьшили до 12 мм. При этом высоту кольцевой защитной маски увеличили до 10 мм. Поверхность Cu сохранила такую же вогнутую форму с краями разной высоты, но значение $\Delta h_{\text{ср}}$ уменьшилось до 41 мкм. Поверхность электрода со стороны Ag имела такую же цилиндрическую форму, значение приведенного изгиба составляло 178 нм/мм.

Известно, что при электроосаждении металла пленки осадков находятся в напряженном состоянии, и когда осаждение происходит только на одной стороне катода, эти силы напряжения приводят к его изгибу [12]. Чтобы уменьшить кривизну катода, увеличили толщину кремниевой пластины до 2 мм. В результате изгиб электрода уменьшился, и для осажжденного медного электрода диаметром 12 мм приведенный изгиб составил 117 нм/мм.

При сравнении изгибов металлических электродов, осажженных на кремниевые пластины толщиной 1 и 2 мм, видно, что с увеличением толщины пластины до 2 мм изгиб электрода Ag/Cu уменьшается приблизительно в 1,5 раза.

Для уменьшения неровности электрода по краям рядом с основным катодом помещали дополнительные катоды. При формировании медного электрода диаметром 12 мм дополнительный кольцевой электрод помещался на внешнем диаметре защитной маски. Этот электрод отбирал часть тока и значительно снижал неравномерность осаждения Cu по краям. Плотность тока дополнительного катода составляла $i = 5$ мА/см². Полученный в таких условиях слой меди был более равномерный ($\Delta h_{\text{ср}} = 9$ мкм, приведенный изгиб электрода, измеренный со стороны слоя Ag, равен 87 нм/мм).

Для дальнейшего уменьшения неравномерности слоя меди на электроде катод вращался, что обеспечивало перемешивание электролита. Это, в свою оче-

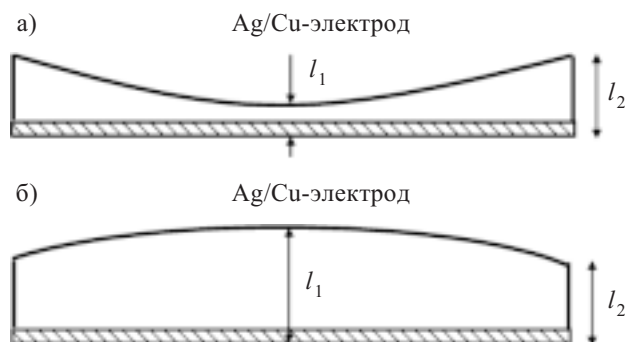


Рис. 4. Вогнутая (а) и выпуклая (б) поверхность меди электрода Ag/Cu, осажженного с конической маской при вращении катода

редь, позволяло получить медную поверхность с равномерными краями и центрально-симметричным изгибом металлического электрода (рис. 2, б) с необходимым знаком изгиба.

Кроме перечисленных способов использовали также конусообразные защитные маски высотой 5 и 10 мм с диаметрами отверстий 9/12, 10/12, 11/12, 12/12 мм. В зависимости от диаметра отверстия защитной маски и угловой скорости вращения катода V_{ϕ} медная поверхность электрода Ag/Cu получалась либо вогнутой (рис. 4, а), либо выпуклой (рис. 4, б). В случае использования масок с диаметрами отверстий 9/12 и 10/12 мм медная поверхность была всегда выпуклой, независимо от угловой скорости вращения катода. При использовании масок с диаметрами отверстий 11/12 и 12/12 мм при $V_{\phi} = 2,5$ об/мин медная поверхность была, в основном, вогнутой, тогда как при $V_{\phi} = 10$ об/мин она была выпуклой. Значения $\Delta h_{\text{ср}}$, $\Delta l_{\text{ср}}$ (различия в толщине электрода между центром и краями) и $\alpha_{\text{ср}}$ приведены в табл. 1. Как видно, минимальный приведенный изгиб получается при использовании маски с диаметрами отверстий 10/12 мм.

Помимо медных анодов стандартного размера (площадь анода в два раза больше площади катода), использовали плоские ($D = 10$ мм) и конусообразные ($D = 8$ мм) аноды. В случае $V_{\phi} = 0$ при использовании стандартной защитной маски высотой 10 мм получали $\Delta h_{\text{ср}} = 13$ мкм. В данном случае использование конусообразных масок и катодного вращения не приводило к значительным изменениям.

Для уменьшения изгиба поверхности использовали асимметричный переменный ток с разными амплиту-

Таблица 1

Характеристики медных электродов диаметром 12 мм, осажженных с конусообразными масками при вращении катода

Диаметр отверстий маски ($d_{\text{min}}/d_{\text{max}}$)	$V_{\phi} = 2,5$ об/мин				$V_{\phi} = 10$ об/мин			
	$\Delta h_{\text{ср}}$, мкм	$\Delta l_{\text{ср}}$, мкм	$\alpha_{\text{ср}}$, нм/мм	Форма поверхности меди	$\Delta h_{\text{ср}}$, мкм	$\Delta l_{\text{ср}}$, мкм	$\alpha_{\text{ср}}$, нм/мм	Форма поверхности меди
9/12	10,5	115	132	выпуклая	12	149	126	выпуклая
10/12	3,7	45,5	110		5	89	84	
11/12	7,4	9,4	192	вогнутая	10,7	75	210	
12/12	4,1	46	232		5,9	39,5	195	

дами прямого и обратного токов. Согласно [13], 80—90% асимметричного переменного тока идет на выращивание слоя Си, а остальной ток используется для анодного растворения поверхности, т. е. идет на сглаживание. В настоящей работе для дополнительного катода использовался асимметричный переменный ток с амплитудой 0,35—1,15 мА и асимметрией 40—90% на частоте 20, 30, 50 Гц. При $V_{\phi}=0$ получали вогнутую поверхность Си электрода с $\Delta l_{\text{ср}}=36$ мкм и $\alpha=132$ нм/мм.

Для осаждения толстых слоев Си использовали асимметричный переменный ток с амплитудой 30—35 мА и защитную маску высотой 5 мм и диаметром отверстия 12 мм. В этом случае получена равномерная поверхность Си с $\Delta l_{\text{ср}}=8,4$ мкм, а значение приведенного изгиба составляло 158 нм/мм при $V_{\phi}=10$ об/мин.

Как известно, увеличение температуры электролита ускоряет процесс осаждения толстого медного слоя, т. к. вызывает значительные изменения условий электролиза: увеличение растворимости солей и электропроводности электролита, уменьшение пассивности анода, улучшение условий диффузии ионов и уменьшение внутреннего напряжения осаждаемого слоя. Кроме того, этот слой становится более пластичным, что способствует лучшему сохранению знака изгиба и формы электродов после расщепления сэндвича. С другой стороны, при высокой температуре образуются осадки крупнокристаллической структуры, т. к. катодная поляризация уменьшается. Это может быть скомпенсировано увеличением плотности тока и перемешиванием электролита [14, 15].

Для исследования зависимости изгиба электрода диаметром 12 мм от температуры медь осаждали с конусообразной защитной маской высотой 10 мм и диаметром отверстия 10/12 мм. Скорость вращения катода составляла $V_{\phi}=10$ об/мин, а плотность тока $i=25\text{—}30$ мА/см². При повышенной температуре (40—45°C) сэндвичи расщепляются в процессе электролиза, и поэтому эксперименты проводили в ограниченном температурном диапазоне 23,5—35°C.

На рис. 5 видно, что при увеличении температуры электролита кривизна электрода уменьшается примерно в три раза. На рис. 2 показаны интерферограммы электродов Si/Ti и Ag/Cu после вскрытия сэндвича, полученного при температуре 35°C.

На следующей стадии эксперимента диаметр электрода Си уменьшали до 3 мм. Слой меди толщиной от 700 до 2300 мкм осаждали при вращении катода со скоростью 2,5 и 10 об/мин при плотности тока 15—20 мА/см². Использовали режим как постоянного

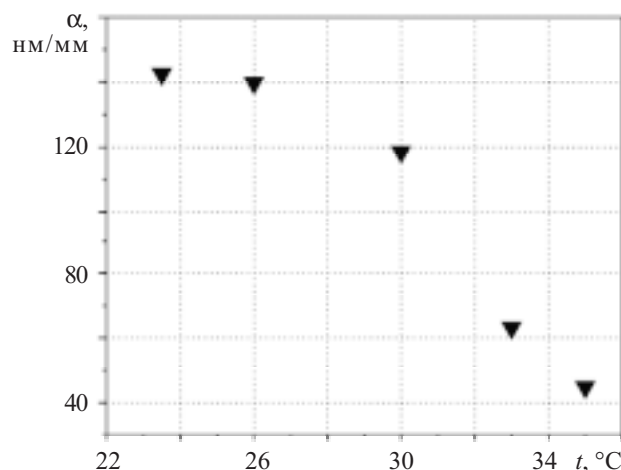


Рис. 5. Зависимость приведенного изгиба электрода Ag/Cu диаметром 12 мм от температуры электролита

(ПТ), так и асимметричного переменного тока (АПТ). Из полученных данных (табл. 2) видно, что при формировании металлического электрода Ag/Cu диаметром 3 мм наилучший результат, т. е. наименьшее значение α ($\alpha_{\text{ср}}=40$ нм/мм), получается при асимметричном переменном токе и скорости вращения катода 10 об/мин.

Был также выращен медный электрод диаметром 3 мм толщиной около 4000 мкм. В этом случае плотность асимметричного переменного тока увеличили до $i=30\text{—}40$ мА/см² и осаждали медь при $V_{\phi}=2,5$ об/мин с защитной маской высотой 5 мм. Исследования были проведены при крайних значениях температурного диапазона электролита — 23,5 и 35°C. Полученные результаты свидетельствуют о том, что с увеличением температуры электролита приведенный изгиб электрода возрастает (при 23,5°C $\alpha_{\text{ср}}$ меняется от значения менее 2,5 до 17,9 нм/мм, при 35°C — от 3,2 до 105,4 нм/мм). Это можно объяснить структурными различиями в осаждаемых слоях меди. Фактически, высокая температура и высокая плотность тока способствуют уменьшению времени роста слоя Си толщиной до 4000 мкм. Из-за высокой скорости роста медные слои были плохого качества — ломкие и пористые, иногда с дендритами, что оказывало влияние на изгиб электрода Ag/Cu.

Из литературы известно [16], что при увеличении толщины осаждаемого слоя размер составляющих его зерен постепенно увеличивается и затем стабилизируется при определенной толщине. Это, в свою очередь, уменьшает величину внутреннего напряжения

Таблица 2

Характеристики электрода Ag/Cu диаметром 3 мм, осаждаемого при постоянном и переменном токе

Характер тока	$V_{\phi}=2,5$ об/мин				$V_{\phi}=10$ об/мин			
	$\Delta h_{\text{ср}}$, мкм	$\Delta l_{\text{ср}}$, мкм	$\alpha_{\text{ср}}$, нм/мм	Форма поверхности меди	$\Delta h_{\text{ср}}$, мкм	$\Delta l_{\text{ср}}$, мкм	$\alpha_{\text{ср}}$, нм/мм	Форма поверхности меди
Постоянный	—	—	—	—	3	6,7	74	выпуклая
Асимметричный переменный	18,5	13,9	53	вогнутая	11	7,3	40	

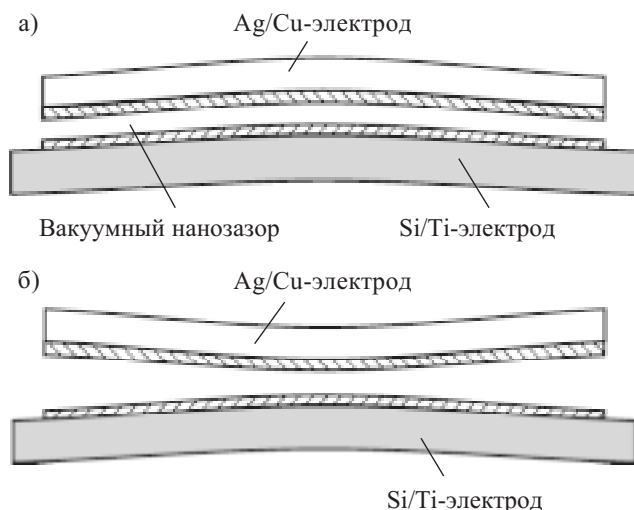


Рис. 6. Сэндвич после вскрытия:

а — электрод Si/Ti выпуклый, электрод Ag/Cu со стороны Ag вогнутый; б — оба электрода выпуклые

слоя осадка до некоторого постоянного значения. Кроме того, при дальнейшем увеличении толщины внутренние напряжения в медном слое постепенно уменьшаются в зависимости от режима электролиза [17]. Для получения толстого слоя меди электрода диаметром 3 мм, осажденного при 23,5°C, была выбрана максимальная плотность тока $i=30\text{—}40\text{ мА/см}^2$. Это давало возможность уменьшить изгиб до 2,5 нм/мм, а в некоторых случаях получить образцы без изгиба ($\alpha_{\text{ср}} < 2,5\text{ нм/мм}$), т. е. максимально конформные электроды.

Исходные кремниевые подложки обрабатываются механической полировкой, поэтому имеют, в основном, выпуклую форму. В процессе роста слоя меди кремниевая пластина деформируется в том или ином направлении по отношению к исходному изгибу. После расщепления сэндвича Si-пластина восстанавливает свой первоначальный изгиб, а металлический электрод Ag/Cu может быть как вогнутым (рис. 6, а), так и выпуклым (рис. 6, б). Следовательно, основным условием обеспечения конформности поверхности двух электродов Si/Ti и Ag/Cu является получение вогнутой со стороны Ag поверхности Ag/Cu-электрода.

Форма поверхности такого электрода зависит от толщины кремниевой пластины и температуры электролита. При осаждении меди на пластины толщиной 1 мм доля электродов с вогнутой поверхностью составляла 22%, а на пластины толщиной 2 мм — до

Таблица 3

Доля вогнутых поверхностей в общем количестве электродов Ag/Cu диаметром 12 и 3 мм, полученных при различной температуре электролита

Диаметр электрода, мм	12					3	
	23,5	26	30	33	35	23,5	35
Доля вогнутых поверхностей, %	54	24	26	80	82	100	85,7

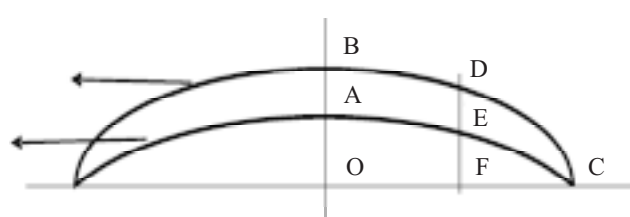


Рис. 7. Поперечное сечение сэндвича:

AEC — поверхность электрода Si/Ti; BDC — поверхность электрода Ag/Cu

59%, т. е. увеличение толщины Si-пластины увеличивает долю вогнутых поверхностей примерно в 2,7 раз.

Соотношение вогнутых и выпуклых поверхностей электрода Ag/Cu диаметром 12 и 3 мм, осажденного на кремниевой пластине толщиной 2 мм, приведены в табл. 3. Видно, что наилучшие результаты для электрода Ag/Cu диаметром 12 мм были получены при температуре электролита 35°C, а для электрода диаметром 3 мм — при температуре 23,5°C.

Площадь контакта поверхностей конформных электродов, повторяющих друг друга (т. е. поверхность Si/Ti выпуклая, а поверхность Ag/Cu со стороны Ag — вогнутая), была рассчитана по простым правилам геометрии [10, 18]. Для этого рассматривали поперечное сечение сэндвича в плоскости, перпендикулярной его поверхности и пересекающей его центр (рис. 7). Область, где расстояние между электродами не превышает 50 Å, можно определить как поверхностный контакт. Площадь контакта — это площадь кольца, внешний радиус которого равен радиусу образца ОС, а внутренний равен OF. Заменяв дуги AC и BC с достаточной точностью на прямые линии, находим, что площадь контакта выражается формулой

$$S = \pi r^2 (\delta/H)(2 - \delta/H).$$

Здесь H — разница максимальных изгибов поверхностей, $H=AB$; δ — расстояние между электродами, $\delta=DE$.

Полученные значения площади контакта поверхностей электродов Si/Ti и Ag/Cu для некоторых образцов диаметром 3 мм приведены в табл. 4. Для вычислений использовали значение $\delta=5\text{ нм}$, а H определяли из выражения $H=n\lambda$ (n — число колец в интерферограмме, $\lambda=3164\text{ Å}$).

Таблица 4

Площадь контакта поверхностей электродов Si/Ti и Ag/Cu диаметром 3 мм, осажденных при разной температуре электролита

$t=23,5^\circ\text{C}$		$t=35^\circ\text{C}$	
Общий изгиб	Площадь контакта, мм ²	Общий изгиб	Площадь контакта, мм ²
<0,025	6—7	1	0,2
<0,025	6—7	0,07	2,8
0,17	1,22	0,04	4,42
0,04	4,42	0,08	2,48
<0,025	6—7	0,33	0,65
0,025	6,05	0,03	5,4

Наилучшие результаты — у электродов Si/Ti и Ag/Cu, полученных в процессе осаждения меди при температуре электролита $t=23,5^{\circ}\text{C}$, причем для трех образцов вся площадь электродов является площадью контакта. Это означает, что вакуумный нанозазор имеет ширину менее 5 нм по всей площади электродов.

Выводы

Таким образом, использование защитных масок в процессе обычного электроосаждения толстого слоя меди на электрод уменьшило разницу в толщине меди по краям электрода. Катодное вращение позволило получить центрально-симметричный изгиб электрода, а также изменить знак изгиба в нужном направлении. Увеличение толщины кремниевой пластины позволило уменьшить приведенный изгиб медного электрода и увеличить долю вогнутых электродов в общем количестве полученных на 37%. В то же время, с увеличением температуры электролита приведенный изгиб уменьшается, а количество электродов с вогнутой поверхностью увеличивается на 28%.

Уменьшая диаметр электрода Ag/Cu до 3 мм и используя асимметричный переменный ток, приведенный изгиб металлического электрода можно уменьшить до 2,5 нм/мм. При температуре электролита $23,5^{\circ}\text{C}$ все поверхности полученных образцов были вогнутые, причем, были получены образцы и без явных признаков изгиба. Расчет площади контакта поверхностей на основе экспериментальных значений изгиба показал, что нанозазор между электродами не превышает 5 нм по всей поверхности электродов диаметром 3 мм.

Конформные поверхности, полученные электроосаждением, можно использовать в качестве электродов в термотуннельных холодильниках с вакуумным нанозазором и в генераторах мощности.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Korotkov A. N., Samuelsen M. R., Vasenko S. A. Effects of overheating in a single-electron transistor // J. Appl. Phys.— 1994.— Vol. 76 (6).— P. 3623—3631.
2. Tavkhelidze A., Skhiladze G., Bibilashvili A. et al. Electron tunneling through large area vacuum gap — preliminary results //

Proc. XXI International Conf. on Thermoelectric.— 2002.— IEEE.— New York.— P. 435—438.

3. Hishinuma Y., Geballe T. H., Moyzhes B. Y., Kenny T. W. Refrigeration by combined tunneling and thermionic emission in vacuum: Use of nanometer scale design. // Appl. Phys. Lett.— 2001.— Vol. 78.— P. 2572.

4. Zeng T. Thermionic-tunneling multilayer nanostructures for power generation // Appl. Phys. Lett.— 2006.— Vol. 88.— P. 153104.

5. Zhang Xin, Zhang Dian-Lin. Tunnelling cooling by a normal-vacuum-superconductor junction // Chinese Phys.— 2007.— Vol. 16.— P. 2656—2660.

6. Tavkhelidze A., Svanidze V., Tsakadze L. Thermotunnel refrigerator with vacuum/insulator tunnel barrier: A theoretical analysis // J. Vac. Sci. Technol. A.— 2008.— Vol. 26(1).— P. 5—7.

7. Hishinuma I., Geballe T. H., Moyzhes B. I., Kenny T. W. Measurements of cooling by room-temperature thermionic emission across a nanometer gap // Appl. Phys. Lett.— 2003.— Vol. 94, N 7.— P. 4690.

8. Джангидзе Л. Б., Тавхелидзе А. Н., Тетрадзе М. О., Девидзе Т. Н. Исследование процесса электролитического осаждения толстого слоя меди при получении конформных поверхностей в многослойных структурах // Микроэлектроника.— 2007.— Т. 36, № 2.— С. 136—140.

9. Талиашвили З. И., Вардосанидзе Л. Р., Джангидзе Л. Б., Тавхелидзе А. Н. Регулирование адгезионной прочности тонких металлических пленок в многослойных структурах // Микроэлектроника.— 2007.— Т. 36, № 5.— С. 359—367.

10. Фриш С. Э. Оптические методы измерения. Ч. 2. Лучевая оптика и границы его применения.— Л.: ЛГУ, 1980.

11. Лайнер В. И. Защитные покрытия металлов.— М.: Металлургия, 1974.

12. Вагранян А. Т., Петрова Ю. С. Физико-механические свойства электролитических осадков.— М.: Изд-во АН СССР, 1960.

13. Дасоян М. А., Пальмская И. Я., Сахарова Е. В. Технология электрохимических покрытий.— Л.: Машиностроение, 1989.

14. Вайнер Я. В., Дасоян М. А. Технология электрохимических покрытий.— М.: Машиностроение, 1972.

15. Гиндлин В. К. Гальванотехника в полиграфии.— М.: Изд-во «Книга», 1965.

16. Поветкин В. В., Ковенский И. М. Структура электролитических покрытий.— М.: Металлургия, 1989.

17. Поперека М. Я. Внутренние напряжения электролитически осажденных металлов.— Новосибирск: Зап.-Сиб. кн. издат., 1966.

18. Ландсберг Г. С. Оптика.— М.: Наука, 1967.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Петров Б. М. Прикладная электродинамика вращающихся тел. Учебное пособие для вузов.— М.: Горячая линия — Телеком, 2009.— 288 с.

Сформулирована ковариантная форма уравнений Максвелла для объектов, возбуждаемых электрическими и магнитными токами. Даны отождествления тензорных объектов и компонент бивекторов и векторных плотностей объектов электромагнитного поля. Получены материальные уравнения, установлены формулы перехода от объектов вращающейся системы отсчета (СО) к объектам инерциальной СО и обратно. Для компонент векторных потенциалов получены системы уравнений во вращающейся СО, играющие роль волновых, найдены их общие решения; последние использованы для решения прикладных электродинамических задач. Проанализированы и рассчитаны характеристики направленности и частотные характеристики излучателей и отражателей. Обнаружены эффекты расширения полосы частот и изменения направленных свойств излучателей. Приведены результаты расчетов и эксперимента.

Для студентов радиотехнических и радиофизических специальностей, выполняющих аттестационные (дипломные, диссертационные) работы, научных работников радиотехнических и радиофизических специальностей.



Д. т. н. А. А. АЩЕУЛОВ

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

Дата поступления в редакцию
25.11.2008 г.

Оппонент д. т. н. Э. М. ШЕР
(ФТИ им. А. Ф. Иоффе, г. С.-Петербург)

БЕСКОНТАКТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Метод основан на определении потерь электрической мощности при возникновении вихревых токов в образце, помещенном в зазор сердечника катушки индуктивности, которую питает асимметричный ток.

Одним из основных параметров термоэлектрических материалов, наряду с коэффициентом термо-эдс, электропроводностью и теплопроводностью, является его эффективность [1]. В настоящее время известно достаточное количество методов ее определения [2, 3], в том числе и с помощью измерения электропроводности термоэлектрического образца в изотермических и адиабатических условиях [4, 5]. Однако следует отметить, что наличие на образцах электрических контактов ведет к повышению погрешности и некоторым неудобствам.

Исследования возможностей вихревого бесконтактного метода контроля электропроводности термоэлектрических материалов [6, 7] показали его перспективность. Целью настоящей работы является изучение физических особенностей такого метода.

В его основу положены физические эффекты взаимодействия электромагнитных полей с исследуемым веществом. Как известно [5], электрическая добротность Q_1 колебательного контура с индуктивностью L и активным сопротивлением R представляется с помощью распределенных параметров следующим образом:

$$Q_1 = \frac{\omega L}{R} = \frac{\omega L I^2}{R I^2} = \frac{P_p}{P_a}, \quad (1)$$

где ω — круговая частота электрических колебаний контура;

I — сила тока в нем;

P_p — реактивная мощность;

P_a — мощность активных потерь в контуре.

При внесении в этот контур образца термоэлектрического материала (см. **рисунок**) мощность вносимых им активных электрических потерь P_{ao} добавляется к мощности активных потерь в контуре. В этом случае электрическая добротность контура с образцом определяется как

$$Q_2 = \frac{P_p}{P_a + P_{ao}}. \quad (2)$$

Выражение для мощности электрических потерь, вносимых в контур этим образцом, имеет следующий вид:

$$P_{ao} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1 Q_2} P_p. \quad (3)$$

В общем случае, эти потери соответствуют электрической мощности, выделяемой в объеме термоэлектрического образца при циркуляции индуктированных токов Фуко, и вызваны, в основном, известными эффектами Джоуля и Пельтье.

При прохождении через измерительный колебательный контур электрического тока вида

$$I_1(t) = 0,5 I_{\max} [1 + \text{sign}(\sin 2\pi F t)] \sin 2\pi f t,$$

где $I_{\max}$ — максимальное значение синусоидального тока;

F и f — частота колебаний импульсов следования и модуляции тока, соответственно,

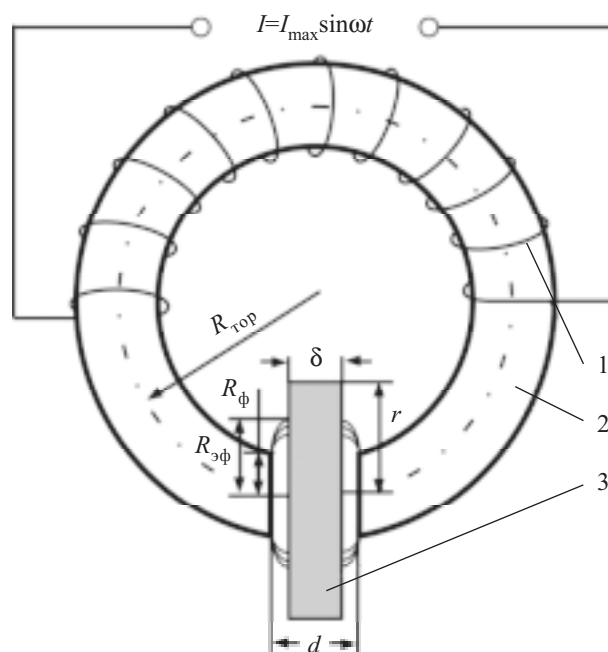


Схема колебательного контура с образцом:
1 — обмотка катушки индуктивности; 2 — тороидальное ферритовое кольцо; 3 — контролируемый образец

Автор выражает искреннюю признательность И. А. Бучковскому и Д. Д. Величуку за полезные дискуссии и обсуждение полученных результатов.

в объеме образца радиуса r индуцируется вихревой электрический ток Фуко плотностью j_{Φ} , представляемый следующим выражением:

$$j_{\Phi} = \sigma_c E = \frac{\sigma_c}{2\pi r} \frac{d}{dt} \int_S B dS = \frac{\sigma_c}{2\pi r} \frac{d}{dt} \int_S \mu H_m [1 + \text{sign}(\sin 2\pi Ft)] \sin 2\pi ft dS, \quad (4)$$

где σ_c — усредненная для переменного тока электропроводность материала образца;

E — напряженность электрического поля;

B — индукция магнитного поля в зазоре ферритового сердечника;

S — площадь сечения сердечника;

μ — магнитная проницаемость материала сердечника;

H_m — напряженность магнитного поля.

Плотность теплового потока, вызванного эффектом Джоуля, в некоторой точке с координатами (x_0, y_0, z_0) равна

$$q_{\text{срДж}}(x_0, y_0, z_0) = \frac{\omega L I^2}{\pi R_{\Phi}^2} \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1 Q_2} = j_{\text{срФ}}^2(x_0, y_0, z_0) \sigma_c^{-1}, \quad (5)$$

где R_{Φ} — эффективный радиус действия магнитного поля;

$j_{\text{срФ}}$ — плотность тока Фуко в точке с координатами (x_0, y_0, z_0) , принадлежащей одной из торцевых граней образца, расположенного в начале лабораторной системы координат XYZ .

Тепловые потери, вызванные эффектом Пельтье, а следовательно, и осевой градиент температуры в этом

случае отсутствуют: $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$.

Усредненное значение электропроводности материала образца равно

$$\sigma_c = c \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1 Q_2 d \left(1 + 4 \ln \frac{R_{\text{тор}}}{R_{\Phi}} \right)}, \quad (6)$$

$$c = \frac{\pi \omega \mu_0 (\mu'_n)^2 R_{\Phi} l_{\text{ср}}}{8 \mu'_\Phi S}, \quad (7)$$

где Q_1, Q_2 — электрическая добротность контура без образца и с образцом, соответственно;

d и $R_{\text{тор}}$ — ширина зазора и средний радиус кольцевого датчика, соответственно;

ω — круговая частота измерительного колебательного контура;

μ'_Φ и μ'_n — динамические магнитные проницаемости материала образца и ферритового сердечника контура, соответственно;

S — площадь его сечения;

$l_{\text{ср}}$ — средняя длина магнитной силовой линии.

Асимметричный электрический ток I_2 , имеющий вид

$I_2(t) = 0, 5 I_{\text{max}} [1 - \text{sign}(\sin 2\pi Ft)] [(1 - z/z_0) + \sin 2\pi ft]$, обуславливает возникновение в зазоре сердечника магнитного поля с индукцией, состоящей из суммы

переменной (синусоидальной) и постоянной составляющих магнитного поля. Переменная составляющая $B_1(t)$ индуцирует в образце токи Фуко, каждое из направлений которого характеризуется собственной магнитной индукцией ($\pm \Delta B'$), взаимодействующей далее с постоянной составляющей B_0 индукции внешнего магнитного поля.

При положительном направлении тока Фуко эти составляющие суммируются ($B_1 = B_0 + \Delta B'$), при отрицательном — вычитаются ($B_2 = B_0 - \Delta B'$). Это ведет к пространственно-временному перераспределению носителей зарядов в объеме термоэлектрического образца. Магнитная индукция разных направлений вызывает протекание токов Фуко разной полярности на противоположных торцевых гранях образца. Такое зональное расслоение токов Фуко ведет к соответствующему объемному перераспределению выделения разнонаправленных потоков тепла Пельтье $q_{\text{срП}}$. Значение плотности теплового потока в точке (x_0, y_0, z_0) в этом случае равно

$$q_{\text{ср}}(x_0, y_0, z_0) = q_{\text{срДж}}(x_0, y_0, z_0) + q_{\text{срП}}(x_0, y_0, z_0). \quad (8)$$

При этом плотность теплового потока представляется выражением

$$q_{\text{срП}}(x_0, y_0, z_0) = \frac{\omega L I^2}{\pi R_{\Phi}^2} \frac{Q_2 - Q_3}{Q_2 Q_3}, \quad (9)$$

а усредненное значение электропроводности материала контролируемого образца равно

$$\sigma_a = c \frac{Q_1 - Q_3}{Q_1 Q_3 d \left(1 + 4 \ln \frac{R_{\text{тор}}}{R_{\Phi}} \right)}, \quad (10)$$

где Q_3 — электрическая добротность контура с образцом в случае асимметричного периодического тока.

Таким образом, асимметричный характер тока I_2 колебательного контура вызывает тепловые потери, обусловленные как эффектом Джоуля, так и эффектом Пельтье, причем их соотношение определяется величиной плотности вихревых токов Фуко j_{Φ} и термоэлектрическими параметрами материала образца. Если значение плотности тока Фуко $j_{\text{срФ}}$, протекающего в некоторой точке образца с координатами (x_0, y_0, z_0) , принадлежащей интервалу $(0 < r \leq R_{\Phi})$, ограничено условием $0 < j_{\text{срФ}} \leq j_0$ (например $j_{\text{срФ}} = \alpha_{\text{ср}} \sigma_a$), то это ведет к выполнению неравенства

$$q_{\text{срДж}}(x_0, y_0, z_0) \ll q_{\text{срП}}(x_0, y_0, z_0).$$

В этом случае осевой градиент температуры в образце не равен нулю $\left(\frac{\partial T}{\partial z} \neq 0 \right)$, что обуславливает появление вдоль его толщины δ разности температуры

$$\Delta T(x_0, y_0, z_0) = \frac{\chi}{\delta} q_{\text{срП}}(x_0, y_0, z_0), \quad (11)$$

где χ — теплопроводность материала образца.

Известно [1], что удельная мощность Пельтье, выделяемая в единице объема термоэлектрического материала, равна

$$q_{удП} = \alpha_{ср} jT, \quad (12)$$

а ее приведенное значение для нашего случая с учетом (11) составляет

$$q_{срП}(x_0, y_0, z_0) = \frac{\alpha^2 \sigma_a T \Delta T}{\delta} = \frac{\omega L I^2}{\pi R_{эф}^2} \frac{Q_2 - Q_3}{Q_2 Q_3}. \quad (13)$$

Усредненное значение коэффициента термо-эдс находим как

$$\alpha_{ср} = \sqrt{\frac{\chi_{ср}}{\sigma_a T}}, \quad (14)$$

где $\chi_{ср}$ — усредненное значение коэффициента теплопроводности материала образца.

С другой стороны, из [1] имеем

$$\alpha_{ср} = \sqrt{\frac{Z_{ср} \chi_{ср}}{\sigma_c}}, \quad (15)$$

где $Z_{ср}$ — коэффициент термоэлектрической эффективности материала образца.

Приравняв (14) и (15), с учетом (6), (7) и (10) получим выражение для термоэлектрической эффективности:

$$Z_{ср} = \frac{\sigma_c}{\sigma_a} \frac{1}{T} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1 - Q_3} \frac{Q_3}{Q_2} \frac{1}{T}. \quad (17)$$

Таким образом, в рамках принятых допущений, вихретоковый метод позволяет бесконтактно определять эффективность термоэлектрических материалов [8]. Исследования образцов на основе кристаллов твердых растворов Bi-Te-Se-Sb, проведенные на соответствующим образом модифицированной уста-

новке [6, 7] с использованием вихретоковых датчиков [9, 10], подтверждают эти выводы. Численные оценки погрешности показывают, что она не превышает 1%.

Конкретные методики определения термоэлектрической добротности Z для случаев термоэлектрически изотропных и анизотропных, а также периодически неоднородных структур и функционально-градиентных материалов будут представлены в последующих публикациях.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Иоффе А. Ф. Полупроводниковые термоэлементы. — М.: Изд. АН СССР, 1960.
2. Harman T. C., Cahn J. H., Loganm J. Measurement of thermal conductivity by utilization of Peltier effect // J. Appl. Phys. — 1950. — Vol. 30, N 9. — P. 1351—1359.
3. Павлов Л. П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. — М.: Высш. школа, 1987.
4. Вайнер А. Л. Термоэлектрические параметры и их измерение. — Одесса: Студия “Негоциант”, 1998.
5. Сурич Ю. В., Шимко В. И., Матвеев В. В. Бесконтактный метод измерения удельного сопротивления пластин полупроводников и эпитаксиальных слоев // Заводская лаборатория. — 1966. — Т. 32, № 9. — С. 1086—1088.
6. Ащеулов А. А., Бучковский И. А., Романюк И. С. Устройство для бесконтактного измерения электропроводности полупроводников // ТКЭА. — 2007. — № 2. — С. 55—57.
7. Ащеулов А. А., Бучковский И. А., Величук Д. Д., Романюк И. С. Бесконтактный измеритель электропроводности термоэлектрических материалов. // Сенсорная электроника и микросистемные технологии. — 2008. — № 1. — С. 38—43.
8. Пат. 29213 України. Процес визначення добротності термоелектричних матеріалів / А. А. Ащеулов, І. А. Бучковський, Д. Д. Величук. — 2008. — Бюл. № 1.
9. Пат. 32279 України. Датчик для безконтактного вимірювання електропровідності термоелектричних матеріалів / А. А. Ащеулов, І. А. Бучковський. — 2008. — Бюл. № 9.
10. Ащеулов А. А., Бучковский И. А., Величук Д. Д., Романюк И. С. Автогенераторные датчики электропроводности // Материалы НПК «Сенсор-2008». — Одесса. — 2008. — С. 12.

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

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

- Датчик угла поворота генераторного типа с элементом на поверхностных акустических волнах (Украина, г. Одесса)
- Прибор для измерения степени однородности пленочных структур в технологии микроэлектроники (Украина, г. Киев)
- Прогнозирование параметров стеклокерамики со стеклокристаллической матрицей для разных соотношений компонентов и режимов спекания (Украина, г. Одесса)
- Непадные контактные соединения в электронных печатных узлах (Украина, г. Одесса)
- Моделирование электрических характеристик и расчёт конструктивных параметров кремниевого стабилизатора с напряжением стабилизации 6,5 В (Беларусь, г. Минск)



- Умножитель/делитель (Украина, г. Одесса)
- Арсенидгаллиевые p^+-n-p^+ -структуры с обедняемой базовой областью (Узбекистан, г. Ташкент)
- Жидкокристаллические мониторы для авиационной техники (Украина, г. Винница)
- КЭС для технологии КНИ на основе проокисленного пористого кремния (Украина, г. Ивано-Франковск)

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

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

А. Э. ИВАНЧИКОВ, А. М. КИСЕЛЬ, А. Б. МЕДВЕДЕВА,
В. И. ПЛЕБАНОВИЧ

Республика Беларусь, г. Минск, Завод полупроводниковых приборов
НПО «Интеграл»
E-mail: office@bms.by

Дата поступления в редакцию
03.06 2008 г. — 16.03 2009

Оппонент к. т. н. Л. В. ЗАВЬЯЛОВА
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ПЛЕНОК КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ СТЕКОЛ ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТОК

Установлено, что оценка качества пленки после различных технологических операций изготовления ИС может проводиться по изменению спектра пропускания пленки. Это позволяет исключить брак ИС, обусловленный обрывом слоя металла.

Основная закономерность развития микроэлектроники на современном этапе состоит в стремительном увеличении степени интеграции при уменьшении линейных размеров элементов схемы с одновременным увеличением их количества. Рост степени интеграции сопровождается увеличением количества металлизированных топологических слоев и количества контактных окон в слоях металла.

При формировании топологии СБИС с субмикронными активными элементами и высокой плотностью их монтажа необходимо решить три технологические задачи:

- обеспечить омический контакт между металлизированными слоями;
- исключить обрывы металлических шин на рельефе микросхемы;
- исключить обрывы пленки металла в контактных окнах.

Проблема плохого контакта между топологическими слоями в большинстве случаев связана с полимерными остатками в области контакта, которые образуются во время плазмохимического травления (ПХТ) при формировании контактных окон в слоях диэлектрика, изолирующего слой металла друг от друга [1]. Эта проблема чаще всего решается путем обработки поверхности микросхем в различных растворах: органических с добавлением аминов; водно-органических, содержащих фторид-ионы [2]; неорганических, содержащих перекись водорода.

Наилучшим способом решения технологической задачи по исключению обрывов металлических шин на рельефе микросхемы является межслойная планаризация поверхности микросхемы при помощи диэлектрических материалов перед созданием каждого уровня металлизации. Одним из способов межслойной планаризации является формирование диэлектрического слоя кремнийорганического стекла (SOG-

материала) методом центрифугирования. Такие материалы характеризуются простотой и экономичностью технологического процесса, хорошими адгезионными свойствами, низким уровнем усадки SOG-пленки и напряжения в ней, хорошей воспроизводимостью характеристик пленки, отличной способностью заполнять узкие зазоры между шинами металла, высокой экологичностью из-за отсутствия выделения токсичных веществ и т. д.

SOG-материалы, которые представляют собой растворенные в органическом растворителе разветвленные полимеры со связями Si–O, можно разделить на три группы: соединения на основе силикатов, кремнийорганические соединения и органические соединения, содержащие легирующие примеси. Формирование твердой диэлектрической планаризирующей пленки из SOG-материала происходит за счет реакции гидролиза-конденсации, т. е. по золь-гелевой технологии. Планаризация поверхности происходит при заполнении углублений рельефа микросхемы SOG-материалом во время нанесения его на горизонтально расположенную пластину, вращающуюся со скоростью в несколько тысяч оборотов в минуту.

В технологии изготовления СБИС с несколькими уровнями топологических слоев наиболее часто применяются кремнийорганические соединения (силоксановые SOG-материалы), которые содержат группы $-\text{CH}_3$ или $-\text{C}_2\text{H}_5$ и при нанесении на поверхность пластины формируют пленку со структурой, приведенной на рис. 1.

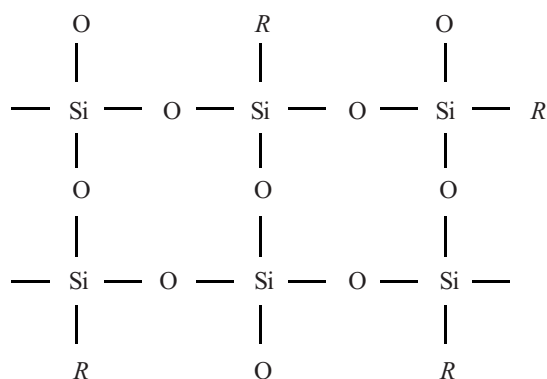


Рис. 1. Молекулярная структура пленки SOG, полученной из силоксанового SOG-материала



Рис. 2. Схема технологического маршрута для контрольных пластин

Технологический маршрут создания слоя диэлектрика между двумя слоями металла включает в себя, как минимум, четыре операции:

- осаждение пленки плазмохимического оксида кремния (ПХО);
- нанесение пленки SOG-материала;
- термический отжиг SOG-материала;
- осаждение пленки ПХО.

В полученной таким образом составной ПХО–SOG–ПХО диэлектрической межслойной пленке, которая сглаживает практически все неровности рельефа микросхемы, методами фотолитографии и плазмохимического травления формируются контактные окна к нижележащему слою металла. При этом профиль сформированного окна должен обеспечивать качественное «запыление» его металлом верхнего уровня. Однако при использовании SOG-материалов для планаризации достаточно часто наблюдаются случаи обрыва металла в области контактных окон из-за подтравливания пленки SOG и искажения вертикального профиля окна. Выявить и исключить причины этого явления — очень актуальная задача.

Настоящая работа посвящена исследованию причин изменения свойств SOG-пленок в процессе выполнения фотолитографии и плазмохимического травления, установлению влияния операций плазмохимического удаления фоторезиста (ПХУФ) на скорость химического травления SOG-пленки и влиянию скорости травления на искажение профиля контактного окна.

Методика исследований

Исследования проводились в типовом технологическом процессе изготовления интегральных КМОП-микросхем с двухуровневой топологией на пластинах КДБ-12 диаметром 150 мм. На всех пластинах формировалась трехслойная диэлектрическая пленка ПХО–SOG–ПХО. В качестве SOG-материала использовался метилсилоксановый SOG марки 315F (фирма Filmtronics).

Пластины были разделены на две группы. При выполнении технологических операций на второй группе первая использовалась в качестве контрольной (в ней формирование топологического рисунка не проводилось, **рис. 2**)

На пластинах второй группы в составной диэлектрической пленке ПХО–SOG–ПХО формировались контактные окна в соответствии со схемой, представленной на **рис. 3**.

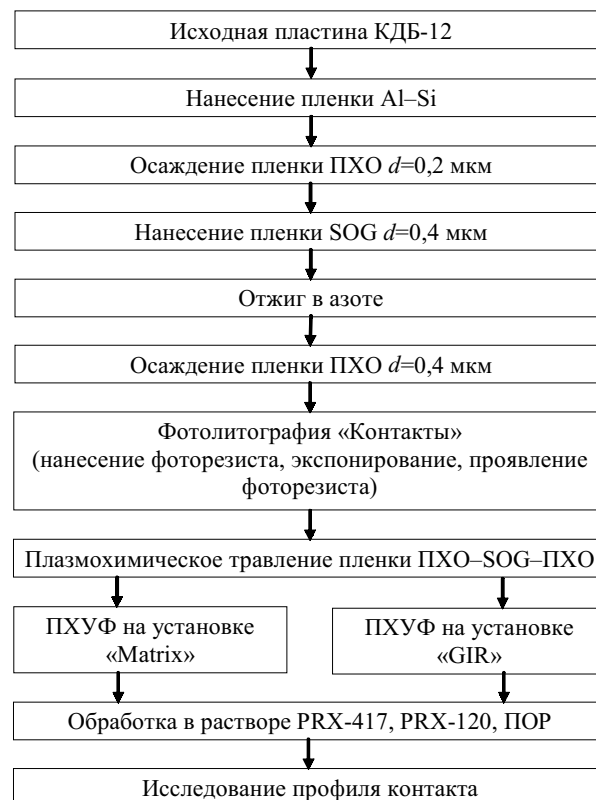


Рис. 3. Схема технологического маршрута для пластин второй группы

Таблица 1
 Параметры процессов плазмохимического удаления фоторезиста

Параметр процесса	Установка Matrix-108	Установка GIR-260S
Частота ВЧ-генератора	2,45 ГГц	13,56 МГц
Температура пластины на столике, °С	250	25
Метод удаления фоторезиста	СВЧ-плазма	Реактивно-ионное травление (ВЧ-плазма)

Операции плазмохимического травления (ПХТ) пленки PXO–SOG–PXO выполнялись на установке GIR-260SO фирмы Alcatel при мощности ВЧ-генератора 700 Вт и объемном соотношении компонентов травителя $\text{Ar}:\text{CF}_4:\text{CHF}_3=30:4:3$.

Операции плазмохимического удаления фоторезиста проводились на установках Matrix-108 и GIR-260S при параметрах процесса, представленных в табл. 1.

Операция удаления полимера выполнялась в одном из растворов:

— PRX-417 (фирма Shipley, США) — водно-органический раствор, содержащий фторид-ионы, время обработки 30 минут при комнатной температуре;

— PRX-120 (фирма Shipley, США) — водно-органический раствор, не содержащий фторид-ионы, время обработки 30 минут при комнатной температуре;

— перекисно-очищающий раствор (ПОР) — водный раствор перекиси водорода, время обработки 10 минут при температуре $70\pm 5^\circ\text{C}$.

После выполнения каждой технологической операции на пластинах первой группы для SOG-пленки определялись показатель преломления, качественный состав пленки, скорость травления в растворе для удаления полимерных остатков после ПХТ.

Показатель преломления определяли на лазерном эллипсометре ЛЭФ-3М-1 с компьютерной обработкой полученных результатов.

Качественный состав SOG-пленки оценивался с помощью спектрофотометра Specord M80 (Германия).

Скорость травления определялась по уменьшению толщины SOG-пленки после обработки в растворах различного состава. Толщина пленки определялась на автоматизированном измерителе толщины LTS-M/SP фирмы Leica.

Параллельно на пластинах второй группы контролировался профиль контактного окна и качество его очистки от полимерных остатков после ПХТ межслойного диэлектрика. Для исследования профиля контактных окон использовался растровый электронный микроскоп фирмы Hitachi.

Анализ результатов исследований

Основной причиной отсутствия контакта между двумя слоями металлов Me-1 и Me-2 при использовании SOG-материалов для планаризации рельефа микросхемы являются обрывы напыляемого металла Me-2 верхнего уровня в контактных окнах, сформированных в межслойном диэлектрике PXO–SOG–

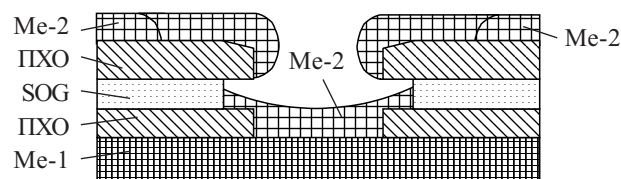


Рис. 4. Обрыв слоя «Me-2» при искажении вертикального профиля контактного окна

PXO (рис. 4). Это связано с искажением вертикального профиля контактного окна вследствие значительного бокового подтравливания пленки SOG при удалении полимерных остатков в органических растворах, содержащих F^- -ионы.

При сопоставлении технических характеристик SOG-материала типа 315F и скорости его травления в растворе PRX-417 было установлено, что структурное изменение пленки SOG, в результате которого значительно увеличивается скорость ее травления может произойти при выполнении операций, предшествующих химической обработке. Это и приводит к возникновению боковых полостей в контактных окнах.

Типовой маршрут формирования контактных окон в диэлектрической пленке PXO–SOG–PXO включает в себя следующие технологические операции:

- формирование топологического рисунка контактных окон в слое фоторезиста;
- плазмохимическое травление пленки PXO–SOG–PXO через маску фоторезиста;
- плазмохимическое удаление фоторезиста;
- отжиг в среде кислорода при температуре 425°C ;
- удаление полимерных остатков в химических растворах различного состава.

Очевидно, что первая и последняя операции не влияют на структуру пленки SOG, но она может измениться при выполнении любой из трех операций: плазмохимического травления, плазмохимического удаления фоторезиста, отжига в среде кислорода.

Также было установлено, что скорость травления пленки SOG 315F практически не изменяется после выполнения операций отжига и плазмохимического травления (табл. 2).

В то же время, операция плазмохимического удаления фоторезиста, выполняемая в кислородной плазме, оказывает значительное влияние на свойства пленки SOG. Установлено, что скорость травления пленки SOG во фторсодержащих растворах зависит от энергетических параметров плазмы и, соответственно, от типа установки ПХУФ. Так, после выполнения операции ПХУФ на установке Matrix-108 скорость травления пленки SOG 315F в растворе PRX-417 возрастает в несколько раз, причем последующий отжиг в среде азота (425°C , 20 мин) не приводит к восстановлению свойств пленки и снижению скорости травления (табл. 2). Из фотографий на рис. 5, а, б видно, что после выполнения операции ПХУФ на установке Matrix-108 и удаления полимера в растворе PRX-417 профиль контактного окна изменяется. При этом появляется полость из-за сильного бокового подтравливания пленки SOG. Такой профиль контактного окна в дальнейшем приводит к обрыву слоя металла.

Скорость травления пленки SOG 315F в растворе PRX-417 после выполнения различных операций

Выполненные операции	Раствор для удаления полимера	Скорость травления SOG-пленки, нм/мин
Нанесение SOG	PRX-417	9
Нанесение SOG — отжиг в N ₂	PRX-417	0,3
Нанесение SOG — отжиг в N ₂ — ПХТ SOG	PRX-417	0,5
Нанесение SOG — отжиг в N ₂ — ПХТ SOG — ПХУФ на установке Matrix	PRX-417	3,88
Нанесение SOG — отжиг в N ₂ — ПХТ SOG — ПХУФ на установке GIR	PRX-417	0,93
Нанесение SOG — отжиг в O ₂ — ПХТ SOG	PRX-417	0,59
Нанесение SOG — отжиг в N ₂ — ПХТ SOG — ПХУФ на установке Matrix — обработка в PRX-417 — отжиг в N ₂	PRX-417	3,62
Нанесение SOG — отжиг в O ₂	PRX-417	0,3
Нанесение SOG — отжиг в N ₂ — ПХТ SOG	PRX-120	0
Нанесение SOG — отжиг в N ₂ — ПХТ SOG	ПОР	0

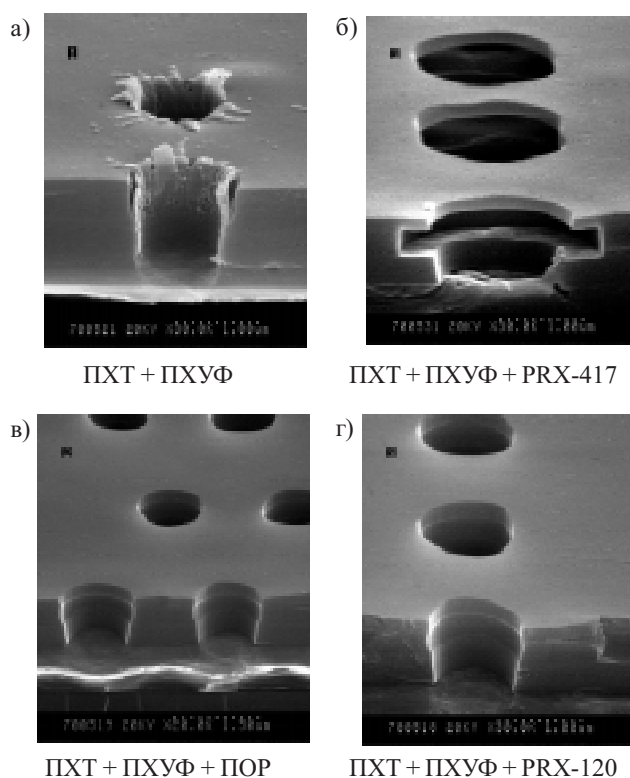


Рис. 5. Вид контактных окон в слое ПХО–SOG–ПХО после удаления фоторезиста на установке Matrix для различных режимов удаления полимера

При удалении полимерных остатков в растворах, не содержащих ионы F⁻ (рис. 5, в, г) профиль контакта не нарушается, т. к. не происходит травления пленки SOG. Однако при этом полимер удаляется не полностью.

При выполнении операции ПХУФ на установке GIR-260 (рис. 6) профиль контактного окна в меньшей мере подвержен изменениям в процессах химической обработки. Однако в этом случае во всех исследуемых растворах не наблюдалось полного удаления полимера из области контакта.

При анализе параметров процесса ПХУФ (табл. 1), скорости травления пленки SOG после различных

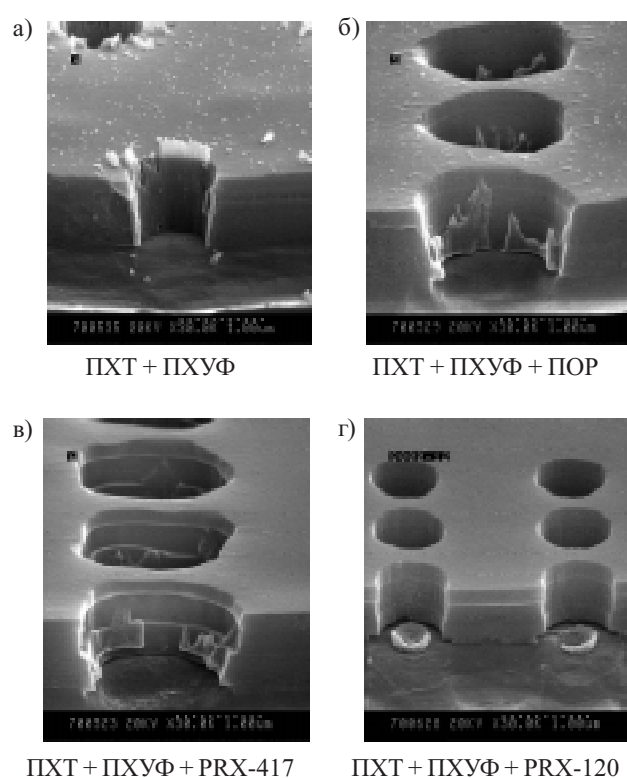


Рис. 6. Вид контактных окон в слое ПХО–SOG–ПХО после удаления фоторезиста на установке GIR для различных режимов удаления полимера

обработок (табл. 2) и полученных профилей контактных окон (рис. 5, 6) было установлено, что радикалы кислорода, образующиеся в СВЧ-плазме на установке Matrix-108, обладают высокой проникающей способностью и энергией, достаточной для изменения химического состава пленки SOG по всей глубине проникновения радикалов. Это приводит к повышению скорости травления пленки SOG в растворах, содержащих F⁻-ионы. Кроме того, под воздействием радикалов кислорода модифицируется полимер, что способствует его полному удалению в растворах PRX-417, PRX-120 и ПОР.

Таблица 3
Значения показателя преломления пленок SOG после обработки

Вид обработки SOG	<i>n</i>
Отжиг в N ₂	1,402
Отжиг в N ₂ + ПХУ SOG	1,413
Отжиг в N ₂ + ПХУ SOG + ПХУФ на установке Matrix	1,419
Отжиг в N ₂ + ПХУ SOG + ПХУФ на установке GIR	1,433
Пленка SOG без обработки	1,424
Отжиг в O ₂	1,419

Что касается радикалов кислорода, образующихся в ВЧ-плазме на установке GIR-260, то их проникающая способность и энергия значительно ниже. Вследствие этого практически не происходит изменения состава пленки SOG и состава полимерных загрязнений при удалении фоторезиста, что значительно ухудшает качество очистки контактных окон от полимера в химических растворах.

Для оценки качества пленки SOG необходимо выбрать параметр, отражающий ее структурные изменения. Из приведенных в табл. 3 результатов эллипсометрических измерений видно, что показатель преломления пленки SOG после различных обработок находится практически на одном уровне (1,4—1,42). Следовательно, по изменению показателя преломления невозможно отслеживать структурные изменения в пленке.

Анализ спектров пропускания пленок SOG в диапазоне длин волн 2,5—50 мкм после различных технологических операций позволил установить изменение химического состава пленок. Все исследуемые образцы SOG-пленок, кроме образца, обработанного на установке ПХУФ Matrix, имеют полосы поглощения на длинах волн 7,8; 9,1 и 9,5 мкм, соответствующие поглощению связей Si—CH₃, Si—O и гидроксильной группы —O—H (рис. 7, а). Образец, обработанный на установке ПХУФ Matrix (рис. 7, б) не имеет полос поглощения, соответствующих связи Si—CH₃ и гидроксильной группе. Однако спектр этого образца имеет полосу поглощения с $\lambda=9,3$ мкм, соответствующую поглощению связи Si—O. Отсутствие в пленке SOG связей Si—CH₃ и Si—OH после обработки ее в кислородной СВЧ-плазме максимально приближает химический состав пленки SOG к составу диоксида кремния, что и обуславливает травление пленки в растворе PRX-417 в соответствии с уравнением реакции



Проведенные исследования показали, что основной причиной изменения структуры пленки SOG, используемой для планаризации рельефа в межслойном диэлектрике, является воздействие на пленку кис-

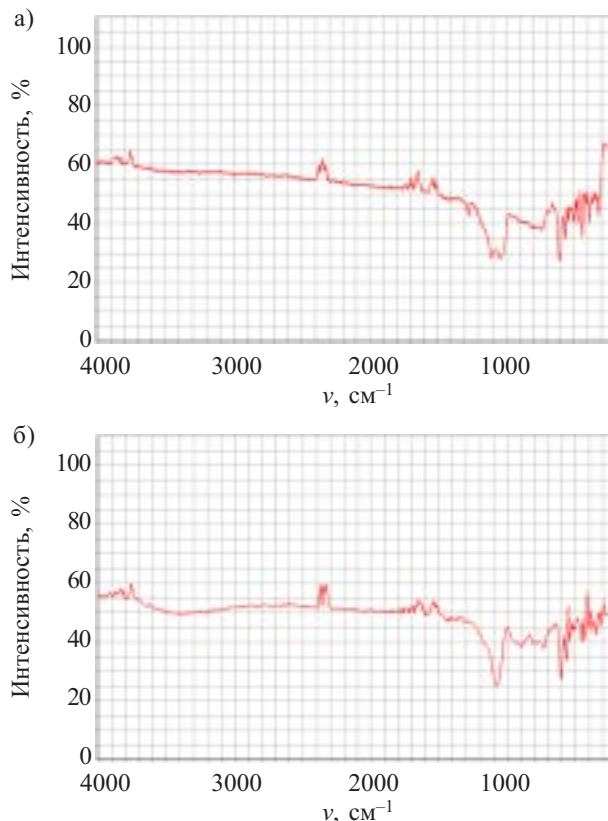


Рис. 7. ИК-спектры пропускания пленки SOG 315F до и после обработки:

а — после нанесения SOG-пленки и отжига в N₂; б — после ПХУФ на установке Matrix

лородной СВЧ-плазмы при плазмохимическом удалении фоторезиста.

Обработка в кислородной ВЧ-плазме не приводит к модификации пленки SOG. Однако при этом происходит неполное удаление полимера из контактных окон.

При изучении взаимосвязи между качественным составом пленок SOG и их техническими характеристиками было установлено, что оценка качества пленки после различных операций технологического процесса изготовления интегральных микросхем может проводиться по изменению спектра пропускания пленок.

Использование результатов данной работы позволит исключить брак ИМС, обусловленный обрывом слоя металла и отсутствием контактов между слоями.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Плазменная технология в производстве СБИС / Под ред. Н. Айнспрука, Д. Брауна. — М.: Мир, 1987.
2. Иванчиков А. Э., Кисель А. М., Медведева А. Б. и др. Методы удаления полимерных загрязнений, вызванных плазмохимическим травлением // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2003. — № 5. — С. 46—50.

К. ф.-м. н. М. В. ДМИТРИЕВ, к. т. н. И. Н. ЕРИМИЧОЙ,
к. т. н. Л. И. ПАНОВ

Украина, Одесский национальный политехнический университет
E-mail: panov.leonid@gmail.com

Дата поступления в редакцию
25.12 2008 г.

Оппонент д. х. н. В. Н. ТОМАШИК
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ КОМПОНЕНТОВ МОНОАРМИРОВАННОЙ СТЕКЛОКЕРАМИКИ СО СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ

Приведены методики оценки объемных долей и диэлектрической проницаемости стекла, кристаллической фазы и наполнителя, реализуемых в стеклокерамике при разных режимах спекания.

Современное развитие и совершенствование композиционных материалов в мировой практике обеспечивается прогрессивными технологиями и новейшими теоретическими разработками. Это позволяет сократить время, средства и объем экспериментов при разработке новых технологий и создавать конкурентоспособные изделия. К таким композициям относятся стеклокерамические композиционные материалы (СКМ) для различных по назначению и конструкции изолирующих изделий радиоэлектроники и электротехники [1—4]. Простейшие из них формируются из одного стекла для матрицы и одного армирующего наполнителя, улучшающего свойства композита и обеспечивающего формоустойчивость заготовки при спекании [5]. Такой СКМ может дополнительно содержать кристаллизующуюся при спекании фазу в стекле [6] или на границе «стекло—наполнитель» [7, 8].

Свойства СКМ легко варьировать, а производство стеклокерамических изделий не требует больших энергетических и материальных затрат [2, 4], благодаря чему можно постоянно совершенствовать материал и его производство.

На параметры СКМ неоднозначно влияют свойства составляющих материалов, их количество, соотношение в композиции и многие другие факторы, создающие необходимость проведения большого количества экспериментов. Время разработки нового или улучшения существующего СКМ можно сократить, если применять комплексные методы исследования (теория + эксперимент), которые позволяют прогнозировать свойства композита и существенно снизить долю экспериментов [9].

В формулы аналитических методов исследования входят параметры компонентов не в исходном их состоянии, а в составе изготовленного СКМ. Поэтому необходимо проведение первичного, натурного, эксперимента. Вторичные, вычислительные, эксперименты базируются на экспериментальных данных и комплексных методах прогнозирования свойств композита. Ранее эти методы были использованы при изучении двухкомпонентного СКМ без кристаллической

фазы [5], двухкомпонентного СКМ с кристаллической фазой в стекле [6] или на границе компонентов [10] и трехкомпонентного СКМ без кристаллической фазы [11]. Объемные доли и диэлектрические параметры компонентов, вычисленные в этих структурах для различных условий изготовления, позволили оценить влияние на свойства СКМ свойств материалов исходных компонентов и материала кристаллической фазы, а также количества и соотношения исходных компонентов.

Целью настоящей работы является изучение влияния на параметры двухкомпонентной стеклокерамики с кристаллизующимся стеклом еще одного воздействующего фактора — продолжительности спекания при фиксированной температуре — в продолжение исследований, начатых в [12].

Первичный (натурный) эксперимент

Для исследований был выбран СКМ, разработанный ранее для широкого применения в промышленности [2—4, 13], представляющий собой гибридный стеклокристаллического материала и стеклокерамического композита, в состав которого стеклофаза входит в качестве одного из компонентов. Его синтез осуществляется методом порошковой металлургии жидкофазным спеканием мелкодисперсного композиционного и гомогенизированного порошка из частиц исходных компонентов. В качестве исходных компонентов использовали свинцовоборосиликатное кристаллизующееся стекло, состав которого приведен в табл. 1, и тугоплавкий кристаллический оксид алюминия — глинозем ГН-1, содержащий 95% α - Al_2O_3 (ГОСТ 6912-87 ТУ) и имеющий температуру плавления 2050°C. Методики получения порошка и изготовления из него образцов для исследований аналогичны приведенным в [5]. Эти образцы позволяют не только получить исходные данные для вычислительных экспериментов, но и экспериментально определить материал кристаллизующейся фазы.

С помощью качественного рентгенофазового анализа в исследуемом материале был выявлен кристобалит — одна из трех основных кристаллических форм SiO_2 (см. табл. 1).

Выбранное соотношение компонентов СКМ в массовых долях наполнителя m_n и стекла m_c составляло $m_n:m_c=0,55:0,45$ при плотности наполнителя и стекла 3700 [5] и 2970 [12] кг/м³ и их диэлектрической проницаемости 11 [5] и ≈ 4 , соответственно. Оно обус-

Таблица 1

Свойства оксидов стекла [15, с. 29, 220] и кристобалита и результаты расчета их объемных долей для крайних случаев: при отсутствии кристаллизации ($y_{\text{кф}}=0$) и при кристаллизации всего SiO_2 ($y_{\text{кф}}=\text{max}$)

Формула	Параметры компонентов			Расчетные данные			
	Массовая доля m_i	Плотность ρ_i , кг/м ³	Диэлектрическая проницаемость ϵ	$10^5 \frac{m_i}{\rho_i}$		y_i	
				$y_{\text{кф}}=0$	$y_{\text{кф}}=\text{max}$	$y_{\text{кф}}=0$	$y_{\text{кф}}=\text{max}$
Стекло							
SiO ₂	0,38	2200	3,5—4,1 3,7*	17,3	—	0,506	—
PbO	0,19	9530	22	1,99	1,99	0,058	0,060
B ₂ O ₃	0,13	1844	3,1—3,2	7,05	7,05	0,206	0,212
Al ₂ O ₃	0,12	3700	11	3,24	3,24	0,095	0,097
ZnO	0,05	5660	18,0	0,88	0,88	0,026	0,026
MgO	0,06	3650	3,2	1,64	1,64	0,048	0,049
CaO	0,07	3370	3,0	2,08	2,08	0,061	0,063
Кристобалит							
SiO ₂	1	2320**	инф. не найдена	—	16,4	—	0,493
$\sum_{i=1}^7 10^5 \frac{m_i}{\rho_i} :$							
				34,18	33,28		

* [16, с. 48]

** [14, с. 104]

Таблица 2

Экспериментальные данные и результаты расчета параметров СКМ при соотношении $y_{\text{н}}:y_{\text{с}}=0,495:0,505$

Экспериментальные данные		Расчетные данные				
Время спекания τ , ч	Диэлектрическая проницаемость СКМ ϵ	Объемные доли			Диэлектрическая проницаемость	
		$y_{\text{фс}}$	$y_{\text{кф}}$	$y_{\text{ос}}$	$\epsilon_{\text{с}}$	$\epsilon_{\text{ос}}$
$t_{\text{сп}}=900^{\circ}\text{C}; \Delta\tau=0,40; B=0,30$						
0,5	7,90	0,015	0,008	0,497	5,71	5,74
1,0	7,90	0,083	0,042	0,463	5,71	5,90
2,0	7,77	0,193	0,097	0,408	5,53	5,97
3,5	7,54	0,306	0,154	0,351	5,21	5,85
$t_{\text{сп}}=950^{\circ}\text{C}; \Delta\tau=0,25; B=0,60$						
0,5	7,92	0,070	0,035	0,470	5,74	5,90
1,0	8,30	0,183	0,092	0,413	6,30	6,97
2,0	8,21	0,329	0,166	0,339	6,16	7,61
3,5	7,90	0,434	0,219	0,286	5,71	7,50

ловлено необходимостью минимизировать долю стекла для создания сплошной матрицы с тонкой и достаточно прочной скрепляющей прослойкой между частицами наполнителя. Это позволило максимально улучшить диэлектрические параметры СКМ, поскольку у наполнителя они лучше, чем у стекла. Определение диэлектрической проницаемости СКМ ϵ осуществлялось по величине измеренной емкости образцов при температуре 25°C . Измерения выполнены на частоте 1 МГц в соответствии с ОСТ 110303-86 при соблюдении требуемых размеров и количества образцов измерителем Е7-12. Результаты определения ϵ в зависимости от времени спекания τ при двух

фиксированных значениях температуры $t_{\text{сп}}$ приведены в табл. 2.

Приведенный в табл. 1 состав стекла обеспечил возможность создания СКМ с заданными свойствами [2—4]. Отклонение от указанного состава приводило к изменению режимов его изготовления и, как следствие, к ухудшению параметров СКМ, поскольку при этом изменялись диэлектрические свойства стекла и СКМ, качество, плотность и прочность стекла и СКМ, доля кристаллической и некристаллической частей стекла, температура начала его размягчения и диапазон температуры беспористого спекания. Такое отклонение снижало также теплопроводность

стекла и СКМ, их химическую стойкость и влапоустойчивость, повышало время и температуру спекания СКМ и разброс значений линейной усадки, приводило к возникновению пор, деформации изделия при спекании СКМ и др.

Каждый компонент в составе стекла выполняет определенную роль. Оксид свинца обеспечивает беспористое спекание, B_2O_3 является флюсом, Al_2O_3 влияет на диэлектрические и другие свойства и на долю кристаллической фазы, ZnO выступает кристаллизатором, MgO и CaO улучшают химическую стойкость, влияют на электрофизические свойства и снижают температуру спекания. Состав выбранного стекла обеспечил возможность получения беспористого СКМ при спекании в широком диапазоне температур (850—970°C). А так как наличие пор ухудшает параметры материала и влияет на результаты расчетов, была получена возможность проанализировать влияние температуры из этого диапазона на скорость кристаллизации.

Из приведенных в табл. 2 данных не совсем понятно, почему зависимость диэлектрической проницаемости композита от продолжительности спекания для температуры 900 и для 950°C существенно отличается, от каких параметров СКМ это зависит, как взаимосвязаны между собой эти параметры и происходящие при этом процессы, и чего ожидать от дальнейшего увеличения t . Вместе с тем, ответы на эти вопросы важны и при разработке СКМ с нужными свойствами, и при изготовлении продукции с правильно выбранными режимами спекания, которые должны отличаться для изделий с разными массой и габаритами. Их можно получить после проведения вторичных, вычислительных, экспериментов.

Вторичные (вычислительные) эксперименты

Теоретической базой комплексных методов исследования является простая формула, применимость которой для расчетов была доказана экспериментально [5]. Она отражает логарифмический закон смешивания компонентов, опубликованный в [17]. Для диэлектрических параметров (D -параметров) композита она имеет вид:

$$\ln D = \sum_{i=2}^k y_i \ln D_i, \quad (1)$$

где D, D_i — параметр композита и его i -х компонентов, соответственно;

y_i — объемные доли i -х компонентов;
 k — количество компонентов.

Применимость формулы (1) при расчетах свойств многокомпонентных СКМ была дополнительно подтверждена с помощью степенной формулы [18]

$$D^n = \sum_{i=2}^k y_i D_i^n, \quad (2)$$

где n — показатель степени ($n \leq 10^{-4}$ для любых, практически встречаемых величин D).

Достоверность формул (1) и (2) устанавливали по соответствию вычисленных значений D_i диапазону известных данных либо ожидаемому значению [5, 18,

11]. Объемные доли i -х компонентов композита в отсутствие пор определялись по формуле [19, с. 33]

$$y_i = \frac{m_i / p_i}{\sum_{i=1}^k (m_i / p_i)}. \quad (3)$$

Для диэлектрической проницаемости исследуемого СКМ формула (1) приобретает вид:

$$\ln \epsilon = y_i \ln \epsilon_i + y_n \ln \epsilon_n = y_i \ln \epsilon_i + y_{i\bar{n}} \ln \epsilon_{i\bar{n}} + y_{\bar{o}\bar{o}} \ln \epsilon_{\bar{o}\bar{o}}, \quad (4)$$

где индексы n, c, oc, kf соответствуют наполнителю, стеклокристаллической матрице, остаточному стеклу и кристаллической фазе.

Параметры ϵ и $\epsilon_c, \epsilon_{oc}$ и ϵ_{kf} являются эффективными, т. к. отражают соответствующие характеристики макрообъема, которые отличаются от таких же характеристик микрообъема. Для ϵ это ϵ_n и ϵ_c ; для ϵ_c это ϵ_{oc} и ϵ_{kf} . Параметр ϵ_{oc} является эффективным, поскольку отражает свойство остаточного стекла, степень изменения состава которого в разных частях его макрообъема различна. Параметр ϵ_{kf} является эффективным по двум причинам. Во-первых, стеклокристаллическая матрица, как и ситаллы, представляет собой объединение беспорядочно ориентированных кристалликов, частично сросшихся и расположенных внутри скрепляющего их остаточного стекла [20, с. 5] (отличие от структуры ситаллов состоит в наличии дополнительных тугоплавких частиц наполнителя в матрице СКМ). Во-вторых, в исследуемом СКМ реализуется низкотемпературная модификация кристобалита, который кристаллизуется в тетрагональной (псевдокубической) сингонии с различными свойствами по двум осям симметрии кристалла [21, с. 273].

Аналогичный вид имеет степенная формула, полученная из (2).

Диэлектрические свойства остаточного стекла и стеклокристаллического компонента СКМ отличаются из-за расходования части диоксида кремния на образование кристобалита. Плотность кристобалита выше плотности диоксида кремния в составе исходного стекла, поэтому при спекании СКМ происходит некоторое изменение его объема. Чтобы это изменение не повлияло на результаты определения объемных долей компонентов СКМ, оно не должно быть ощутимым. Для установления изменения объема необходимо сравнить максимально возможные значения объемных долей SiO_2 в составе стекла y_{SiO_2max} для двух крайних случаев: при $y_{kf}=0$, т. е. в отсутствие кристаллизации, и при $y_{kf}=max$, т. е. при кристаллизации всего диоксида кремния.

Для расчета y_{SiO_2max} использовали формулу (3), в которой m_i и p_i рассчитывали не для компонентов СКМ, а для оксидов стекла (табл. 1). Из полученных данных следует, что y_{SiO_2} принимает максимально возможное значение 0,506 в отсутствие кристаллизации и 0,493 — при кристаллизации всего объема SiO_2 . Если в качестве y_{SiO_2max} принимать значение $(0,506+0,493)/2=0,50$, то при объемной доле стекла в СКМ $y_c=0,505$ (см. табл. 2) значение относительно-

го изменения объема СКМ составляет $(0,506 - 0,50) \cdot 0,505 / 0,506 \approx 0,006$ (0,6%). Столь малое изменение объема СКМ при образовании кристобалита практически не влияет на результаты расчетов объемных долей компонентов композита с использованием формул (1)–(4).

Объемные доли наполнителя y_n и стекла y_c у двухкомпонентного СКМ и у такого же СКМ, но с кристаллической фазой, практически не отличаются при одинаковых массовых долях наполнителя m_n и стекла m_c . Поэтому объемные доли y_n и y_c были вычислены по формуле (3), как и для двухкомпонентного материала (табл. 2).

Необходимость в определении объемной доли кристобалита y_{kf} обусловлена его непосредственным влиянием не только на свойства СКМ, но и на долю стекла, расходуемого на образование этой фазы. Это, в свою очередь, приводит к изменению свойств стекла, что отражается на свойствах СКМ. Кроме того, определить объемные доли основных компонентов СКМ можно только после оценки величины y_{kf} .

Для определения объемной доли кристобалита в стекле y_{fc} воспользуемся ее зависимостью от времени:

$$y_{fc} = y_{fc\max} [1 - e^{-B(\tau - \Delta\tau)}], \quad (5)$$

где $y_{fc\max}$ — максимально возможная объемная доля кристобалита в стекле, равная 0,50;

B — коэффициент, зависящий от скорости роста кристаллов и температуры спекания;

$\Delta\tau$ — отрезок времени от начала спекания СКМ до начала кристаллизации стекла.

Известно, что без предкристаллизационной термообработки кристаллизация стекла начинается после некоторого инкубационного периода (≈ 25 мин) [22, с. 10]. Образование ядер или зародышей кристаллизации в этот период стимулирует дальнейшую равномерную и одновременную кристаллизацию стекла. Значение $\Delta\tau$ может равняться инкубационному периоду, если начало последнего совпадает с началом спекания СКМ в момент достижения максимальной температуры, т. е. с началом отсчета времени τ . Если начало инкубационного периода предшествует началу отсчета времени спекания, $\Delta\tau$ может принимать меньшие значения или равняться нулю. Это может быть при повышенной температуре, когда до начала отсчета τ создаются благоприятные тепловые условия для ядрообразования.

Роль катализаторов кристаллизации в порошковой технологии может выполнять либо развитая поверхность мелкодисперсного порошка [23], либо центры ядрообразования, возникающие на поверхности частиц из других материалов [22, с. 8]. Во втором случае происходит гетерогенное катализируемое зарождение центров кристаллизации. Наличие этих явлений при спекании исследуемого СКМ дает основания считать происходящую при этом кристаллизацию самопроизвольной, но самостимулированной, поскольку роль катализаторов выполняет развитая поверхность порошка из частиц разных материалов, и для ядрообразования не предпринимаются специальные дополнительные меры.

В формуле (5) $y_{fc\max} = 0,50$; $\Delta\tau$ может принимать значения из диапазона 0–25 мин; а значение τ задано условиями эксперимента (табл. 2). Незвестным является значение B , которое различно для различных значений температуры и длительности спекания. Это связано с тем, что зависимость скорости роста кристаллов и скорости образования центров кристаллизации от температуры нагрева стекла описывается кривой с максимумом [22, с. 84].

Поскольку значение B неизвестно, то для решения поставленных задач сначала необходимо представить в количественном выражении серию зависимостей объемной доли кристобалита в стекле y_{fc} от произвольно задаваемых значений B при разных значениях τ и $\Delta\tau$. При вычислениях примем $\Delta\tau$ равным 0,4 ч при $t_{\text{сп}} = 900^\circ\text{C}$ и 0,25 ч — при $t_{\text{сп}} = 950^\circ\text{C}$. В последнем случае предполагается, что инкубационный период начинается на 0,15 ч раньше достижения температуры 950°C благодаря тому, что температура достаточно высока для начала ядрообразования. Результаты вычислений по формуле (5) сведены в табл. 3, из которой видно, как влияют на значение y_{fc} значения B , τ и $\Delta\tau$. В частности, при $B \geq 1,60$ с ростом y_{fc} начинается насыщение y_{fc} , вызванное стремлением к нулю остатков диоксида кремния в стекле.

В табл. 3 приведены также значения τ_m — времени достижения начала насыщения объемной доли кристобалита в стекле для двух значений $\Delta\tau$. Расчет τ_m осуществлялся в предположении, что выражение в квадратных скобках формулы (5) отличается от единицы не более чем на 0,1% и имеет вид

$$e^{-B(\tau_m - \Delta\tau)} = 10^{-3},$$

откуда $B(\tau_m - \Delta\tau) = \ln 10^3 = 6,908$ и

$$\tau_m = \frac{6,908}{B} + \Delta\tau. \quad (6)$$

Подставив в (6) различные значения B и $\Delta\tau$ из табл. 3, получим значения τ_m для диапазона $B = 0,05 - 2,30$. Полученные сведения позволяют выявить зависимость y_{fc} от B , τ и $\Delta\tau$, соответствующую данным натурного эксперимента. Для этого предлагается использовать один из способов определения значения B . Во-первых, можно использовать данные табл. 1–3, не выполняя дополнительных экспериментов, во-вторых, экспериментально определить величину τ_m и, в-третьих, определить значение y_{kf} в СКМ для одного из значений длительности спекания с помощью количественного рентгено-фазового анализа (РФА).

Первый способ нахождения значения B начинается с вычисления диэлектрической проницаемости закристаллизованного стекла ϵ_c с помощью формулы, полученной из (4):

$$\ln \epsilon_c = \frac{\ln \epsilon - y_n \ln \epsilon_n}{y_c}. \quad (7)$$

Рассчитанные зависимости $\epsilon_c = f(\tau)$ для двух значений температуры спекания представлены на рис. 1 и в табл. 2. Общим в этих зависимостях является снижение ϵ_c при $\tau \geq 1$ ч (кривые 1 и 2), что можно объяс-

Таблица 3

Объемная доля кристобалита в стекле $y_{\text{фс}}$ при различных значениях B и τ и время кристаллизации всей массы SiO_2 (τ_m)

B	$y_{\text{фс}}$ при $\Delta\tau=0,4$ ч				$y_{\text{фс}}$ при $\Delta\tau=0,25$ ч				τ_m , ч	
	τ , ч				τ , ч				$\Delta\tau$, ч	
	0,5	1,0	2,0	3,5	0,5	1,0	2,0	3,5	0,4	0,25
0,05	0,003	0,015	0,039	0,073	0,006	0,019	0,042	0,076	138,6	138,4
0,10	0,005	0,029	0,075	0,135	0,012	0,037	0,081	0,140	69,5	69,3
0,15	0,008	0,044	0,108	0,188	0,019	0,054	0,117	0,195	46,5	46,3
0,20	0,010	0,057	0,139	0,234	0,025	0,070	0,149	0,242	34,9	34,8
0,25	0,012	0,070	0,167	0,273	0,031	0,087	0,179	0,281	28,0	27,9
0,30	0,015	0,083	0,193	0,306	0,037	0,102	0,207	0,315	23,4	23,3
0,35	0,017	0,096	0,217	0,335	0,042	0,117	0,232	0,344	20,1	20,0
0,40	0,020	0,108	0,239	0,360	0,048	0,131	0,255	0,368	17,7	17,5
0,45	0,022	0,120	0,260	0,381	0,054	0,045	0,276	0,389	15,8	15,6
0,50	0,025	0,131	0,279	0,399	0,059	0,158	0,295	0,406	14,2	14,1
0,60	0,029	0,153	0,312	0,427	0,070	0,183	0,329	0,434	11,9	11,8
0,70	0,034	0,174	0,341	0,448	0,081	0,207	0,357	0,457	10,3	10,1
0,80	0,039	0,193	0,365	0,064	0,092	0,228	0,381	0,468	9,0	8,9
1,00	0,048	0,228	0,404	0,483	0,112	0,267	0,418	0,486	7,3	7,2
1,10	0,053	0,244	0,419	0,488	0,122	0,284	0,432	0,492	6,7	6,5
1,20	0,057	0,260	0,432	0,494	0,131	0,300	0,444	0,496	6,2	6,0
1,30	0,062	0,274	0,443	0,497	0,140	0,315	0,454	0,499	5,7	5,6
1,40	0,066	0,288	0,452	0,499	0,149	0,329	0,462	0,501	5,3	5,2
1,60	0,075	0,312	0,467	0,502	0,167	0,354	0,475	0,504	4,7	4,6
1,95	0,090	0,349	0,484	0,505	0,195	0,389	0,489	0,505	3,9	3,8
2,30	0,104	0,379	0,493	0,506	0,221	0,416	0,497	0,506	3,4	3,3

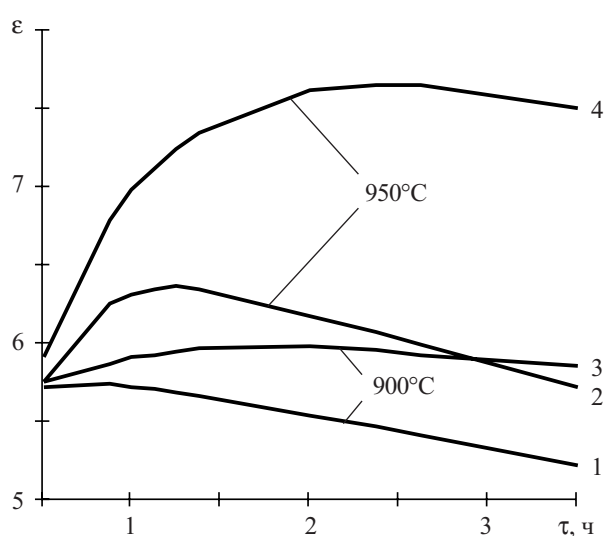


Рис. 1. Зависимость диэлектрической проницаемости стекла (1, 2) и остаточного стекла (3, 4) от времени спекания при различной температуре спекания

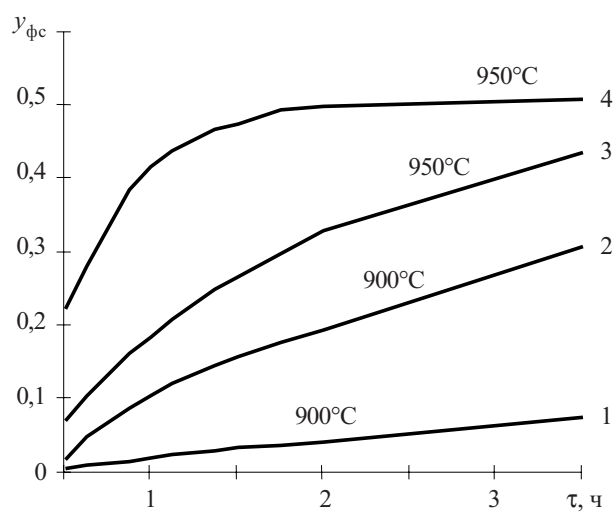


Рис. 2. Зависимость объемной доли кристобалита в стекле от времени спекания при различной температуре спекания для различных значений B : 1 — 0,05; 2 — 0,30; 3 — 0,60; 4 — 2,30

нить уменьшением объемной доли остаточного стекла y_{oc} с ростом τ из-за роста доли кристобалита y_{fc} , т. к. $y_{oc} = y_c - y_{fc}$. В начале процесса спекания, когда $\tau = 0,5 - 1,0$ ч, наблюдается различие зависимостей $\epsilon_c = f(\tau)$: при 900°C значения ϵ_c одинаковые; при 950°C их увеличение обусловлено большей скоростью роста кристаллов.

Уменьшение доли SiO_2 в исходном стекле из-за его расходования на образование кристобалита приводит к относительному повышению в остаточном стекле доли PbO , диэлектрическая проницаемость которого в несколько раз больше, чем у SiO_2 (табл. 1), что увеличивает ϵ_{oc} , причем при 950°C эффективнее, чем при 900°C . По-видимому, при 900°C в диапазоне $\tau = 0,5 - 1,0$ ч процессы уменьшения y_{oc} и роста ϵ_{oc} компенсируют друг друга таким образом, что произведение $y_{oc} \ln \epsilon_{oc}$ в формуле (4) не изменяется.

На рис. 2 представлены графики зависимости $y_{fc} = f(\tau)$ при $t_{сп} = 900^\circ\text{C}$ и $B = 0,05$ (кривая 1) и при $t_{сп} = 950^\circ\text{C}$ и $B = 2,30$ (кривая 4), демонстрирующие крайние случаи из табл. 3. Особенность их заключается в том, что на кривой 1 величина y_{fc} мала ($< 0,08$), а на кривой 4 имеется участок насыщения y_{fc} при больших значениях τ . Эти данные, в сочетании с приведенными в табл. 2 значениями ϵ_c , позволяют определить расположение графиков зависимости $y_{fc} = f(\tau)$, соответствующих полученным экспериментально.

Но во-первых, для обеих температур значения y_{fc} должны быть ощутимо больше, чем представленные кривой 1 на рис. 2, иначе слабее выражалось бы снижение ϵ_c с ростом τ при $\tau \geq 1$ ч (рис. 1). Во-вторых, для обеих температур значения y_{fc} должны быть ощутимо меньшими, чем представленные кривой 2 на рис. 2, иначе наблюдалось бы насыщение кривых 2 и 3 на рис. 1 при исследованных значениях τ , которое должно происходить при $\tau > 3,5$ ч. Поэтому искомые зависимости $y_{fc} = f(\tau)$ должны соответствовать или мало отличаться от кривых 2 и 3 на рис. 2 с соответствующими коэффициентами B . В табл. 3 эти зависимости и значения τ_m для них выделены.

Второй способ определения значений B является более точным, но требует проведения дополнительных экспериментов по определению значений τ_m . Для этого в образцах СКМ, аналогичных использованным в первичном, натурном, эксперименте, определяется несколько значений ϵ_c вблизи предполагаемого значения τ_m , которое определяется по началу насыщения диэлектрической проницаемости СКМ. Для сокращения необходимого количества дополнительных образцов следует использовать результаты, полученные при использовании первого способа, в котором значения τ_m оценены приближенно. По найденному значению τ_m по табл. 3 определяется искомое значение коэффициента B .

Третий способ определения значения B основан на определении y_{fc} методом количественного РФА, который является более сложным, трудоемким и дорогостоящим, чем метод качественного РФА [21, с. 209]. Поэтому сокращение таких измерений до одного значения τ является предпочтительным. Резуль-

тат такого определения y_{fc} позволяет в табл. 3 найти искомое значение B .

Второй и третий способы завершаются, по аналогии с первым, определением зависимости $y_{fc} = f(\tau)$ для $t_{сп} = 900$ и 950°C с помощью найденного значения B и данных табл. 3. В табл. 2 эта зависимость оценена с помощью первого способа. Полученные результаты позволяют вычислить объемные доли кристобалита y_{kf} в СКМ и остаточного стекла y_{oc} по формулам $y_{kf} = y_{fc} y_c$ и $y_{oc} = y_c - y_{kf}$ (табл. 2).

Значение диэлектрической проницаемости остаточного стекла ϵ_{oc} можно вычислить с помощью формулы, полученной из (4):

$$\ln \epsilon_{oc} = \frac{y_c \ln \epsilon_c - y_{kf} \ln \epsilon_{kf}}{y_{oc}}. \quad (8)$$

Значение диэлектрической проницаемости кристобалита y_{kf} в литературных источниках не обнаружено. Вышеприведенный анализ особенностей поликристаллического строения кристобалита в синтезированном СКМ и анализ диэлектрической проницаемости диоксида кремния как в виде незакристаллизованного спеченного порошка (табл. 1), так и в виде других форм, позволил оценить ϵ_{kf} и сделать вывод, что $\epsilon_{kf} \approx 4$, что и было использовано при расчете по формуле (8). Результаты вычислений ϵ_{oc} для разных τ и $t_{сп}$ сведены в табл. 2.

Первый способ оценки коэффициента B по сравнению с двумя другими обладает меньшей точностью, но меньшими трудо- и материальными затратами. Он предпочтительнее для использования на многократно повторяющихся начальных стадиях разработки СКМ, когда достаточно приблизительной информации. Его также целесообразно применять в сочетании со вторым способом.

Обсуждение результатов

Приведенные в табл. 2 результаты вторичных (вычислительных) экспериментов позволяют не только оценить вклад каждого компонента в величину параметра всего СКМ, но и связать полученные величины с процессами кристаллизации стекла. О процессах ядро- и кристаллообразования можно получить информацию лишь непрямым путем, наблюдая количественные изменения физических характеристик стекла. В нашем случае оказалось возможным это сделать, наблюдая изменение диэлектрической проницаемости и объемных долей части компонентов СКМ: доли кристобалита, диэлектрической проницаемости и доли остаточного стекла и диэлектрической проницаемости стеклокристаллической матрицы (табл. 2).

Анализ табличных данных показывает, что эффективность отмеченного влияния компонентов зависит от абсолютных величин их параметров и от характера изменения их объемных долей. Наблюдаемое увеличение ϵ_{oc} (рис. 1) тем больше, чем больше $t_{сп}$ и τ , т. к. с повышением температуры спекания уменьшается вязкость стекла и повышается скорость роста кристаллов, а с ростом τ увеличивается расход SiO_2 . В результате величина $y_c \ln \epsilon_c$, отражающая в формуле (4) стеклокристаллическую матрицу, с ростом $t_{сп}$ и τ изменяется сложным образом. Определенные с помо-

щью предложенных способов значения коэффициента B позволяют прогнозировать величину объемной доли кристобалита в стекле для любых значений $\tau=\tau_m$, используя для этого формулу (5).

Предложенные методики могут использоваться при изготовлении крупногабаритных изделий из СКМ. В этом случае необходимо увеличивать время спекания, чтобы обеспечить равномерную по всему объему усадку, выдержку геометрии и исключение внутренних напряжений.

Выполненная работа показывает один из путей решения задач, возникающих при разработке СКМ, и нацелена на проведение небольшого объема экспериментов с применением большого объема теоретических расчетов и может быть полезной при разработке композитов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Shimada Y., Utsumi K., Nakayama M. et al. Firing low temperature multilayer glass-ceramic substrate // IEEE Transaction of Components, Hybrids and Manufacturing Technology.— 1983.— Vol. 6, N 4.— P. 382—386.
2. Дмитриев М. В. Композиционная радиостеклокерамика // Тр. Одесск. политехн. ун-та.— 1999.— Вып. 2 (8).— С. 209—211.
3. Дмитриев М. В. Стеклокерамические основания резисторов // Тр. Одесск. политехн. ун-та.— 1999.— Вып. 1 (7).— С. 89—91.
4. Дмитриев М. В., Еримичой И. Н., Панов Л. И. Стеклокерамические основания конденсаторов // Тр. 8-й Междунар. науч.-практич. конф. «СИЭТ-2008».— Одесса.— Т. II.— С. 84.
5. Дмитриев М. В. Влияние концентрации компонентов и пор на диэлектрическую проницаемость стеклокерамики // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 1997.— № 4.— С. 34—38.
6. Дмитриев М. В. Прогнозирование диэлектрических свойств композиционной стеклокерамики с кристаллизуемым стеклом для разных соотношений компонентов // Материалы электронной техники.— 2000.— № 3.— С. 35—37.
7. Дмитриев М. В. Стеклокерамика с продуктом взаимодействия стекла и наполнителя: диэлектрическая проницаемость // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 1999.— № 4.— С. 44—46.
8. Дмитриев М. В. Диэлектрические свойства стеклокерамики для разных соотношений стекла, наполнителя и продукта их взаимодействия // Изв. вузов. Электроника.— 2000.— № 6.— С. 11—14.
9. Дмитриев М. В. Комплексные методы определения и прогнозирования параметров для оптимизации диэлектрических свойств композитов // Тр. 2-й Междунар. науч.-практич. конф. «СИЭТ-2001».— Одесса.— С. 198.
10. Дмитриев М. В. Прогнозирование доли продукта взаимодействия стекла и наполнителя для разных соотношений компонентов стеклокерамики // Порошковая металлургия.— 2000.— № 1/2.— С. 57—61.
11. Дмитриев М. В., Еримичой И. Н., Панов Л. И., Панова Е. Л. Прогнозирование диэлектрических свойств некристаллизующейся моноармированной полиматричной стеклокерамики // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2008.— № 5.— С. 58—62.
12. Дмитриев М. В. Влияние режимов спекания на параметры стеклокерамики с кристаллизуемым стеклом // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2000.— № 1.— С. 36—39.
13. А. с. 1782947 СССР. Стеклокерамический композиционный материал / Л. В. Буран, М. В. Дмитриев, В. Д. Лемза, Л. Н. Тартаковская.— 1992.— Бюл. № 3.
14. Справочник химика: Основные свойства неорганических и органических соединений Т. 2 / Под ред. О. Н. Григорова.— Л.: Химия, 1971.
15. Физико-химические свойства окислов / Под ред. Г. В. Самсонова.— М.: Металлургия, 1978.
16. Чайлдс У. Физические постоянные.— М.: Гос. изд. физ.-мат. литер., 1962.
17. Lichteneker K., Rother K. Die Herleitung des logarithmischen Mischungsgesetzes des Allgemeinen Prinzipien der stationären Stromung // Physikalische Zeitschrift.— 1931.— Bd. 32, N 6.— S. 255—267.
18. Дмитриев М. В. Степенная связь параметров композиционного материала и его компонентов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2002.— № 4—5.— С. 58—61.
19. Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов.— Л.: Энергия, 1974.
20. Структурные превращения в стеклах при повышенных температурах / Под ред. Н. А. Торопова, Е. А. Порай-Кошица.— Москва, Ленинград: Наука, 1965.
21. Торопов Н. А., Булак Л. Н. Кристаллография и минералогия.— Л.: Изд. литер. по строит., 1972.
22. Безбородов М. А. Стеклокристаллические материалы.— Минск: Наука и техника, 1982.
23. Тахер Е. А., Федосеева Т. И., Дайн Э. П. и др. Катализируемая кристаллизация стекол // Тр. Всесоюз. симпозиума.— Москва.— 1982.— С. 124—127.

НОВЫЕ КНИГИ

У. Наундорф. Аналоговая электроника: основы, расчет, моделирование.— М.: Техносфера, 2008.— 472 с.

В книге подробно рассмотрены основные электронные элементы и базовые схемы на них. Особое внимание уделяется нелинейным элементам, они анализируются посредством соответствующего приближения, затем их характеристики моделируются на компьютере.

На CD записаны используемые в процессе изучения программы SPICE и GNUPLLOT, а также документация и программы-примеры для систем LINUX и Windows.

Большое количество упражнений, возможность проверять расчеты посредством компьютерного моделирования, наглядность делают книгу прекрасным современным учебником, особенно полезным студентам первых курсов, изучающим электронику в технических университетах. Книга предназначена также инженерам-практикам, техникам и всем интересующимся электроникой и схемотехникой.



С. С. ДРОЗД, к. т. н. К. Я. МАМЕДОВ,
к. т. н. Ю. С. ЯМПОЛЬСКИЙ

Украина, Одесский национальный политехнический университет
E-mail: sergey-profess@km.ru

Дата поступления в редакцию
17.11 2008 г.

Оппонент д. т. н. В. М. ШОКАЛО
(ХНУРЭ, г. Харьков)

ИЗМЕРИТЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА РАДИОЧАСТОТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Рассматривается измерительная установка с повышенным динамическим диапазоном для определения интермодуляционных искажений радиочастотных усилителей. Погрешность измерений, вносимая измерительной установкой, в наихудшем случае не превышает $\pm 2,8$ дБ.

Интермодуляционные искажения усилителей приемопередающей аппаратуры принято оценивать величиной динамического диапазона (ДД) d_3 по интермодуляционной составляющей третьего порядка (ИМС₃) [1, 2].

При измерении величины d_3 радиочастотных усилителей точность и диапазон измерений ограничены собственным ДД анализатора спектра $d_{3\text{зас}}$ измерительной установки. Кроме того, когда измеряемое значение d_3 приближается к величине $d_{3\text{зас}}$, значительно повышается погрешность измерений.

Анализаторы спектра с относительно большим $d_{3\text{зас}}$ имеют высокую стоимость, поэтому представляет интерес создание измерительной установки с повышенным динамическим диапазоном и методики ее применения.

На рис. 1 приведена предлагаемая структурная схема измерительной установки для определения параметра d_3 , в которой, в отличие от [3], применены кварцевый фильтр и анализатор спектра.

Измерение d_3 осуществляется следующим образом. Переключателем SA отключается кварцевый фильтр (КФ) 7. На выходе ГИС1 и ГИС2 устанавливают два равных по амплитуде интермодулирующих сигнала, которые контролируют по анализатору спек-

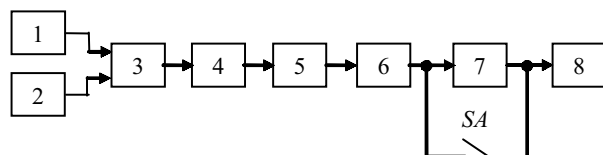


Рис. 1. Структурная схема измерителя ДД радиочастотных усилителей:

1, 2 — генераторы интермодулирующих сигналов (ГИС); 3 — мостовое согласующее и развязывающее устройство; 4 — исследуемый высокочастотный усилитель; 5 — эквивалент нагрузки со ступенчатым выходным аттенуатором на 10, 20 и 30 дБ; 6 — плавно регулируемый аттенуатор; 7 — кварцевый фильтр; 8 — анализатор спектра

тра 8. Разомкнув переключатель SA, т. е. подключив КФ, подстраивают по частоте один из равных интермодулирующих сигналов, например от ГИС1, амплитудой $U_{\text{сзвых}}$ так, чтобы этот сигнал попал в полосу пропускания КФ. Затем на выходе аттенуатора 6 устанавливают затухание Δ_1 , соответствующее уровню 1 мВ на входе анализатора спектра 8. Далее изменяют частоту ГИС1 так, чтобы одна из интермодуляционных составляющих амплитудой $U_{\text{кзвых}}$ вошла в полосу пропускания КФ. Аттенуатором 6 устанавливают затухание Δ_2 , вновь соответствующее амплитуде 1 мВ на входе блока 8. Разность показаний аттенуатора в полосе пропускания КФ даст значение

$$d_3 = \Delta_1 - \Delta_2, \quad (1)$$

где Δ_1, Δ_2 — показания аттенуатора при настройке на интермодулирующий сигнал и на интермодуляционную составляющую, соответственно.

Графическая интерпретация параметра d_3 показана на рис. 2.

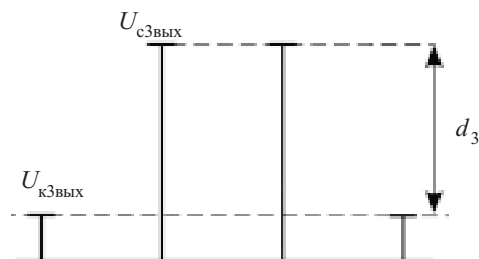


Рис. 2. Графическая интерпретация параметра d_3

При этом методе измерений ДД измерительной установки существенно возрастает, т. к. мощные интермодулирующие сигналы не попадают на вход анализатора спектра.

Оценим погрешность измерений предлагаемой установки.

Пусть погрешности, вносимые элементами структурной схемы, заданы своими допустимыми границами, и нет данных в пользу какого-нибудь распределения. В этом случае можно предположить, что закон распределения погрешностей имеет равномерное распределение, и тогда результирующую погрешность измерительной установки $\delta_{\text{иу}}$ можно определить как

$$\delta_{\text{иу}} = \alpha \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}, \quad (2)$$

где α — коэффициент, зависящий от выбранной доверительной вероятности P , для $P=0,95$ $\alpha=1,1$ [4, с. 96];
 n — количество источников погрешностей;
 δ_i — составляющие погрешностей.

Для измерительной установки, показанной на рис. 1, основными составляющими погрешности являются:

δ_1 — погрешность измерения, обусловленная собственными интермодуляционными искажениями (ИМИ) блоков 1, 2;
 δ_2 — неравномерность (неточность) установки амплитуды двух интермодулирующих сигналов;
 δ_3 — погрешность, обусловленная неравномерностью затухания КФ, вызванной нестабильностью частоты генераторов 1, 2;
 δ_4 — погрешность отсчета амплитуд по анализатору спектра.

Для расчета δ_1 определим влияние ИМИ от двух генераторов 1, 2 на измеряемый ДД в соответствии с выражением [5, с. 95]

$$d_3 = \frac{U_{\text{с3вых}}}{\sqrt{U_{\text{к3г}}^2 + U_{\text{к3г}}^2}},$$

где $U_{\text{с3вых}}$ — амплитуда интермодулирующего сигнала на выходе усилителя;
 $U_{\text{к3г}}$ — уровень интермодуляционной составляющей сигнала на выходе усилителя;
 $U_{\text{к3г}}$ — амплитуда интермодуляционной составляющей из-за взаимного влияния блоков ГИС 1, 2.

Для определения d_3 рассмотрим часто встречающийся на практике случай, когда $U_{\text{к3г}}=0,7U_{\text{к3г}}$. Тогда динамический диапазон транзисторного усилителя с учетом взаимного влияния ГИС1 и ГИС2 составит $d_3=U_{\text{с3вых}}/(1,22U_{\text{к3г}})$, при этом погрешность измерений будет не хуже $\delta_1=\pm 20\lg 1,22=\pm 1,73$ дБ.

В случае неравенства интермодулирующих сигналов амплитудой $U_{\text{с3вых}}$ их отличие в 1 дБ приводит к такому же значению погрешности $\delta_2=\pm 1$ дБ, т. к. в общем случае [1] при неравенстве интермодулирующих сигналов

$$d_3 = \frac{4}{H_3 U_{\text{с3вх1}} U_{\text{с3вх2}}},$$

где H_3 — параметр нелинейности третьего порядка;
 $U_{\text{с3вх1}}, U_{\text{с3вх2}}$ — амплитуды интермодулирующих сигналов на входе усилителя.

Составляющую δ_3 определим, предполагая, что КФ имеет амплитудно-частотную характеристику с максимально-плоской вершиной и ослабление сигнала при заданной нестабильности частоты генераторов 1, 2 и полосы пропускания фильтра составляет $\pm 0,5$ дБ, т. е. $\delta_3=\pm 0,5$ дБ.

Составляющая δ_4 , в соответствии с техническим описанием анализатора спектра, равна ± 1 дБ.

Определим погрешность измерительной установки $\delta_{\text{из}}$ в соответствии с (2):

$$\delta_{\text{из}} = 1,1\sqrt{1,73^2 + 1^2 + 0,5^2 + 1^2} \approx 2,5 \text{ дБ}.$$

Теперь определим влияние вторых гармоник генераторов 1, 2 на результат измерения d_3 .

Наличие второй гармоники от ГИС эквивалентно появлению во входном сигнале усилителя составляющей $U_2 \cos \omega_2 t$. В этом случае напряжение на входе

$$u(t) = E_0 + U_{\text{с3вх}} \cos \omega_1 t + U_2 \cos \omega_2 t,$$

где E_0 — напряжение смещения, определяющее режим работы транзистора (линейный или с отсечкой тока);
 $U_{\text{с3вх}}$ — амплитуда интермодулирующих сигналов на входе усилителя;
 ω_1 — частота первой гармоники сигнала;
 U_2 — амплитуда второй гармоники;
 ω_2 — частота второй гармоники.

Для усилителей на транзисторах с линейной проходной характеристикой выходной ток можно представить рядом Тейлора, ограничившись тремя его составляющими:

$$i = f(E_0) + S(U_{\text{с3вх}} \cos \omega_1 t + U_2 \cos \omega_2 t) + \frac{1}{2} S'(U_{\text{с3вх}} \cos \omega_1 t + U_2 \cos \omega_2 t)^2 + \frac{1}{6} S''(U_{\text{с3вх}} \cos \omega_1 t + U_2 \cos \omega_2 t)^3, \quad (3)$$

где S, S', S'' — крутизна проходной характеристики транзистора в рабочей точке и ее первая и вторая производные, соответственно.

Выполняя тригонометрические преобразования и группируя слагаемые при косинусах одинаковых аргументов, пренебрегая остальными по причине их малости, получаем:

$$i \approx f(E_0) + S U_{\text{с3вх}} \cos \omega_1 t + S' \frac{1}{8} U_{\text{с3вх}}^2 \cos 2\omega_1 t + S'' \frac{1}{24} (U_{\text{с3вх}}^3 + 3U_2^2 U_{\text{с3вх}}) \cos 3\omega_1 t. \quad (4)$$

Используя это выражение, определим коэффициент гармонических искажений третьего порядка:

$$K_{\text{Г3}} = \frac{1}{24} \frac{S''}{S} U_{\text{с3вх}}^2 + \frac{1}{8} \frac{S''}{S} U_2^2.$$

Коэффициент интермодуляционных искажений третьего порядка k_3 связан с $K_{\text{Г3}}$ соотношением $k_3=3K_{\text{Г3}}$ [6, с. 106], то есть

$$k_3 = \frac{1}{8} \frac{S''}{S} U_{\text{с3вх}}^2 + \frac{3}{8} \frac{S''}{S} U_2^2. \quad (5)$$

Физический смысл полученного выражения заключается в том, что взаимодействие второй гармоники ГИС на входе исследуемого усилителя с основной (первой) гармоникой ГИС приводит к появлению новых компонент ИМС₃ на выходе усилителя. В результате эти компоненты спектра «накладываются» на собственные интермодуляционные составляющие усилителя. Таким образом, второе слагаемое определяет дополнительную погрешность измерений δ_2 , связанную с наличием U_2 от ГИС. Динамический диапазон по ИМС₃ под влиянием вторых гармоник d_{32} , исходя из выражения (5), удобно представить как

$$d_{32} = k^2 \frac{d_3}{k^2 + 3}, \quad (6)$$

где $k=U_{сзвх}/U_2$ — коэффициент, показывающий во сколько раз первая гармоника сигнала ГИС больше второй; обычно $k \gg 1$.

Из выражения (6) следует, что вторая гармоника влияет на результат измерений d_3 только в том случае, если она одного порядка с основной.

Для определения погрешности δ_2 примем наблюдаемый на практике случай, когда вторая гармоника ГИС на 20 дБ меньше интермодулирующего сигнала. В этом случае $k=10$, и тогда $\delta_2 \approx \pm 0,3$ дБ.

Полную погрешность измерений определяем как $\delta = \delta_{иу} + \delta_2 = 2,8$ дБ.

Таким образом, применение кварцевого фильтра с затуханием сигнала вне полосы пропускания более 25...35 дБ позволяет исключить перегрузку анализатора спектра сигналами ГИС1 и ГИС2 и повысить собственный динамический диапазон измерителя на 20...30 дБ. При этом расчетная величина погрешности измерений, вносимая установкой, в наихудшем случае не превышает $\pm 2,8$ дБ. Измерительная установка также может быть применена для определения уровней интермодуляционных составляющих средне-

мощных и мощных усилителей низкой частоты при замене кварцевого фильтра на соответствующий низкочастотный LC-фильтр и анализатор спектра.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Сартасов Н. А., Симонтов И. М., Невмержицкий Г. И., Тихонов А. И. Систематизация показателей, характеризующих динамический диапазон радиотехнических устройств по интермодуляции // Техника средств связи. Сер. ТРС.— 1982.— Вып. 10(30).— С. 79—81.
2. Мамедов К. Я., Дрозд С. С., Прокофьев А. Ю. Определение динамического диапазона радиочастотных усилителей / Тр. Науч.-практич. конф. «СИЭТ-2007».— Украина, г. Одесса.— 2007.— С. 249.
3. Ямпольский Ю. С., Мамедов К. Я., Шеремет С. В. Измеритель амплитудной нелинейности радиочастотных усилителей // Труды Одесского политехнического университета.— 1999.— Вып. 2(18).— С. 197—199.
4. Рабинович С. Г. Погрешности измерений.— Л.: Энергия, 1978.
5. Завражнов Ю. В., Каганова И. И., Мазель Е. З. и др. Мощные высокочастотные транзисторы.— М.: Радио и связь, 1985.
6. Игнатов А. Н. Полевые транзисторы и их применение.— М.: Радио и связь, 1984.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: В 2-х томах.— Додэка-XXI, 2008.— 1774 с.

«Полупроводниковая схемотехника» — перевод 12-го издания широко известной книги Ульриха Титце и Кристофа Шенка (в 1982 году издательство «Мир» выпустило перевод 5-го издания этой книги). Это фундаментальный труд, объединяющий принципы устройства полупроводниковых элементов (диоды, биполярные и полевые транзисторы, интегральные микросхемы) и основы создания из этих элементов различных функциональных узлов аналоговой техники (усилителей, модуляторов, фильтров, радиоприемников) и цифровой (спусковых схем, счетчиков, регистров, шифраторов и дешифраторов, устройств памяти и т. д.).

Первый том посвящен основам схемотехники, второй — применениям функциональных узлов при создании более сложных устройств.

При изложении материала широко используются эквивалентные схемы как полупроводниковых элементов, так и функциональных узлов, соответствующие работе в области постоянного тока и низких/высоких частот. Особое внимание уделено также переходным процессам цифровых схем. Описание каждого элемента или схемы сопровождается достаточно простыми формулами, служащими для их инженерного расчета.

Энциклопедическая полнота, обилие самых разных схем и доступное математическое обоснование делают книгу полезной широкому кругу читателей: радиолюбителям, техникам ремонтных предприятий, инженерам радиотехники и электроники и научным работникам.



АННОТАЦІЇ К СТАТТЯМ НОМЕРА

Дудяк А. В., Заслонкін А. В., Ковалюк З. Д., Мінтянський І. В., Савицький П. І. **Первинні джерела струму $\text{Li/Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$.**

Представлено результати дослідження експлуатаційних характеристик електрохімічної системи $\text{Li/Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$. Визначено механізм струмоутворення. Вивчено і проаналізовано імпедансні спектри «2325»-елементів $\text{Li/Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$ при різній глибині розряду. Запропоновано модель еквівалентної електричної схеми, оцінено коефіцієнти, що характеризують електродні реакції.

Медведик А. Д. **Властивості комутаційних комірок, що застосовуються в системах автоматизованого контролю.**

Розглянуто основні властивості комутаційних комірок з довільною кількістю виводів, на базі яких будуються регулярні комутаційні структури. Визначено загальну кількість можливих з'єднань між виводами при заданій кількості незалежних зв'язків, а також максимальну кількість з'єднань, які не повторюються при тих же умовах. Визначено мінімально необхідне число комутуваних елементів, яке задовольняє умовам повноти з'єднань. Зроблено порівняльний аналіз відомих комутаційних структур.

Бондарчук Я. М., Петровська Г. А., Татарин В. Я. **Фізичні основи проектування дзеркал оптичних резонаторів поліхромних лазерів.**

Розглянуто фізичну модель дзеркал резонаторів поліхромних лазерів з відповідним графічним і математичним обґрунтуванням процесу їх проектування. Оптиміальні інтерференційні структури синтезуються з урахуванням нелінійного характеру спектральної залежності коефіцієнта поглинання. Наводяться приклади дзеркал Ar^+ -лазерів видимого діапазону, що отримані в результаті проектування. Представлено результати випробування розроблених інтерференційних покриттів. Вихідна потужність малопотужних Ar^+ -лазерів збільшується на 50%, потужних — до 20%.

Синегуб М. І. **Мікропроцесор зіркоподібної структури.**

Розглянуто питання розробки оригінальної зіркоподібної структури мікропроцесора, в якій об'єднується архітектура суперскалярного мікропроцесора і VLIW-процесора, що дозволяє підвищити швидкодію шляхом збільшення кількості паралельно виконуваних мікропроцесором команд без відповідного збільшення довжини VLIW-команд мікропроцесора. Цей позитивний ефект досягається за рахунок використання властивого пропонуваної структури внутрішнього паралелізму, коли в даному мікропроцесорі застосовуються не лише керовані арифметичні пристрої, але і арифметичні пристрої, що не вимагають команд для завдання режимів роботи.

Dudyak A. V., Zaslonskin A. V., Kovalyuk Z. D., Mintyansky I. V., Savicky P. I. **Primary power sources $\text{Li/Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$.**

The results of investigation of the operating characteristics of the electrochemical system $\text{Li/Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$ are presented. The mechanism of the current forming reaction is established. The impedance spectra of $\text{Li/Cu}_4\text{Bi}_5\text{S}_{10}$ cells are investigated and analyzed at different depths of discharge. A model of the equivalent electrical circuit is proposed, and the coefficients describing the electrode reactions are estimated.

Medvedik A. D. **Properties of commutation cells used in automatized control systems.**

The main properties of commutation cells with arbitrary number of outlets have been examined. The cells of this type form the basis of regular commutation structures design. There were defined the total number of all possible contacts between the outlets at the set quantity of independent connections, and the greatest possible number of non-repeating connections for the same conditions. There was also determined the minimal necessary switched elements quantity at which the condition of connections completeness is satisfied. The comparative analysis of known commutation structures has been provided.

Bondarchuk J. M., Petrovska G. A., Tatarin V. J. **Designing of mirrors of optical resonators of multi-colour lasers.**

The resonator mirrors of wide lasers physical model with a corresponding graphic and mathematical substantiation of process of their designing is examined. The optimum interferential structures are synthesized with the considering of nonlinear character of the absorption factor spectral dependence. The examples of Ar^+ -laser mirrors, which were received as a result of designing, and the result of mirror coverings tests are submitted. The output of low-power Ar^+ -lasers increase up to 50%, and in case of powerful lasers — up to 20%.

Sinegub N. I. **The microprocessor of starshaped structure.**

The problem of working out the original starshaped microprocessor being unified architectures of superscalar microprocessor and VLIW-processor, permitting to raise rapid action by means of increasing a number of instructions carrying-out in parallel by microprocessor without appropriate increasing length of VLIW-instructions of microprocessor has been considered. This positive effect is reached on account of utilizing inner parallelism appropriate to offered structure while not only guided arithmetic devices are applied in given microprocessor but arithmetic devices not requiring instructions for assigning work regimes are applied.

Єфіменко С. А. **Апаратура для моніторингу елементного складу поліметалічних руд РЛП-21.**

Розроблено портативний енергодисперсійний рентгенофлуоресцентний спектрометр (EDXRF) РЛП-21, який дозволяє проводити експрес-аналіз проб руд, ґрунтів, продуктів збагачувальних і металургійних виробництв і одночасно визначати вміст 35 елементів. РЛП-21 дозволяє визначати низький вміст срібла і кадмію. У статті викладено основні принципи, які покладено в основу функціонування спектрометра, можливості програмного забезпечення, метрологічні характеристики.

Касимов Ф. Д., Ібрагимов Р. А., Свіхнушин М. М. **Магнітокомутуєма мікросхема та датчик вимірювання швидкості вітру на її основі.**

У статті представлено опис магнітокомутуємої мікросхеми на основі ефекту Холу. Приведені електрична схема розробленої МКМ і її основні технічні характеристики. Розроблено датчик швидкості вітру на її основі. Діапазон вимірювання швидкості вітру склав 0,5—50 м/с з похибкою $\pm 5\%$.

Сидоренко В. П., Вербицький В. Г., Прокоф'єв Ю. В., Кизяк А. Ю., Ніколаєнко Ю. Є. **НВІС для мікроелектронного координатно-чутливого детектора приладів для елементного аналізу матеріалів.**

Розроблено НВІС, яка забезпечує одночасний аналіз всіх елементів, що увіходять до складу речовини, з високою чутливістю та точністю. НВІС має в своєму складі 384 детектори з кроком 25 мкм. Застосування мікросхеми дозволяє суттєво знизити вагу, розміри, споживану потужність детектора, зменшити час аналізу та витрати матеріалу, що досліджується.

Готра З. Ю., Дячок Д. Т. **Аналіз впливу способу з'єднання стовпчикових виводів інтегральних схем на їх опір.**

Розглянуто модель жорсткого стовпчикового виводу між контактними площадками підкладки ГІС і навісного кристалу. Запропоновано методику визначення електричного опору виводу й визначено за цією методикою опір стовпчикового виводу для різних способів з'єднання. Результати роботи рекомендується використовувати при проектуванні напівпровідникових приладів і мікросхем зі стовпчиковими (кульковими) виводами.

Черкез Р. Г. **Система термоелектричного кондиціонування повітря на основі проникних термоелементів.**

Розглянуто термостатуючий блок термоелектричного кондиціонера на основі проникних термоелементів, в якому для охолодження потоку повітря використані термоелектричні ефекти і ефект Джоуля–Томсона. Описано метод розрахунку розподілу температури, визначення енергетичних характеристик перетворення енергії і метод проектування проникного термоелемента в режимі максимального холодильного коефіцієнта. Результати комп'ютерних досліджень запропонованих систем для випадку використання твердих розчинів на основі Bi_2Te_3 як матеріалу гілок термоелемента показали підвищення холодильного коефіцієнту в 1,6—1,7 разів в порівнянні з традиційними термоелектричними системами.

Yefimenko S. A. **The equipment for monitoring of chemical composition of complex ores RLP-21.**

The portable energy dispersive X-ray fluorescent spectrometer (EDXRF) RLP-21 enables to carry out an express X-ray radiometric analysis of ore and samples, of concentrating and metallurgical manufactures products, defining 35 elements simultaneously. RLP-21 is designed to detect low silver and cadmium content. The main principles forming a basis of a spectrometer's functioning, opportunities of the software, metrological characteristics are stated in this article.

Kasimov F. D., Ibragimov R. A., Svikhnushin N. M. **Magneto switch microcircuit and wind speed measurement's sensor on its base.**

The magneto switch microcircuit on the base of Hall-effect is developed. The electric scheme of the magneto sensitive IC was designed and its basic technical characteristics are described. The gauge of wind speed on its base is fabricated.

Sidorenko V. P., Verbitskiy V. G., Prokofiev Yu. V., Kyziak A. Yu., Nikolayenko Yu. E. **VLSI for microelectronic coordinate-sensitive detector of the devices for element analysis of substance.**

VLSI which provides the simultaneous analysis of all composition of substance with a high sensitivity and precision has been developed. VLSI contains 384 detectors with a spatial resolution 25 microns. Application of the microcircuit allows essential lowering of the weight, size and power consumption of the detector, reducing the period of analysis and the expenditure of the material which is investigated.

Hotra Z. Y., Dyachok D. T. **The analysis of influence of integrated circuits rigid pin leads connection type on their resistance.**

The model of a rigid pin lead between contact platforms of substrate GIC and a hinged crystal is considered. The technique of definition of electric resistance of a lead is offered and by this technique is defined the resistance of a rigid pin lead for different types of connection. The results of work are recommended to be used at designing of semiconductor devices and microcircuits with rigid pin leads.

Cherkez R. G. **The system of thermoelectric air conditioning based on permeable thermoelements.**

There is thermoelectric air conditioner unit on the basis of permeable cooling thermoelements presented. In thermoelectric air conditioner unit the thermoelectric effects and the Joule–Thomson effect have been used for the air stream cooling. There have been described the method of temperature distribution analysis, the determinations of energy conversion power characteristics and design style of permeable thermoelement with maximum coefficient of performance described. The results of computer analysis concerning the application of the thermoelement legs material on the basis of Bi_2Te_3 have shown the possibility of coefficient of performance increase by a factor of 1.6—1.7 as compared with conventional thermoelectric systems.

Джангідзе Л. Б., Тавхелідзе А. Н., Благідзе Ю. М., Таліашвілі З. І. **Електроосадження конформних електродів для отримання тунельного переходу з вакуумним нанозазором.**

Електроосадження мідного електроду на підкладці Si здійснюється для отримання вакуумного нанозазору великої площі для термотунельних приладів. Для отримання правильної геометрії такого електроду і зменшення внутрішньої напруги в ньому використовували обертання катода, різні захисні маски, асиметричний струмовий режим, регулювання і стабілізацію температури електроліту. Зменшення діаметру електроду до 3 мм і збільшення товщини кремнієвої пластини до 2 мм дає можливість виростити електрод з вигином порядку 2,5 нм/мм. Це дозволило отримати два конформні електроди з нанозазором менше 5 нм на площі 7 мм². Такі конформні електроди можна використовувати в пристроях на основі тунельного проходження електронів.

Ашеулов А. А. **Безконтактний метод визначення ефективності термоелектричних матеріалів.**

Досліджено термоелектричні ефекти, що виникають в зразку, розміщеному у вимірювальному коливальному контурі. Показано, що асиметричний характер струму, що протікає, веде до об'ємного розшарування індукованих струмів Фуко і областей виділення тепла Пельтьє термоелектричного зразка, що приводить до зростання необоротних тепловтрат, які реєструються вимірювальним коливальним контуром. Наявність цього ефекту зумовила появу оригінального безконтактного методу реєстрації ефективності різних термоелектричних матеріалів.

Іванчиков О. Е., Кісель А. М., Медведєва Г. Б., Плебанович В. І. **Зміна властивостей плівок кремнійорганічних стеклов після термічної та плазмохімічної обробки.**

Встановлено, що оцінка якості плівки після різних технологічних операцій виготовлення ІС може проводитися по зміні спектру пропускання плівки. Це дозволяє виключити брак ІС, обумовлений обривом шару металу.

Дмитрієв М. В., Єрмічой І. М., Панов Л. І. **Оцінка параметрів компонентів моноармованої склокераміки із склокристалічною матрицею.**

Приведено методики оцінки об'ємних часток і діелектричної проникності скла, кристалічної фази і наповнювача, що реалізуються в склокераміці при різних режимах спікання, що дозволяє прогнозувати частку кристалічної фази і оцінювати вплив умов спікання на ефективність кристалоутворення.

Дрозд С. С., Мамедов К. Я., Ямпольський Ю. С. **Вимірювач динамічного діапазону радіочастотних підсилювачів.**

Запропоновано нову вимірювальну установку, яка має підвищений на 20...30 дБ власний динамічний діапазон, а розрахункова величина похибки вимірювань, що вноситься установкою, в найгіршому випадку не перевищує $\pm 2,8$ дБ. Вимірювальна установка також може бути застосована для визначення рівнів інтермодуляційних складових середньопотужних та потужних підсилювачів низької частоти при заміні кварцевого фільтру на відповідний низькочастотний LC-фільтр і аналізатор спектру.

Djanghaiidze L. B., Tavkhelidze A. N., Blughidze U. M., Taliashvili Z. I. **Electroplating of the conform electrodes for obtaining of a tunnel transition with a vacuum nano-clearance.**

Electroplating of a Cu electrode on a Si substrate is carried into effect in order to get vacuum nano-clearance of a big area for the thermotunnel devices. For obtaining the correct geometry of such an electrode and reduction of the internal tension, there were used the rotation of the cathode, various protective masks, the dissymmetric current mode, the regulation and stabilization of electrolit's temperature. The diameter of electrode reduction down to 3 mm and the increase in thickness of an initial silicon plate up to 2 mm enable to grow up an electrode with a bend of about 2,5 nm/mm. Which made it possible to obtain two conform electrodes with the nano-clearance of less than 5 nm on the area of 7 mm². The conform electrodes of this type may be used in the device based on electrons tunnel transition.

Ashcheulov A. A. **Non-invasive method of determination of thermoelectric materials figure of merit.**

Thermoelectric effects arising in a sample placed in a measuring oscillating loop have been studied. It has been shown that asymmetric character of flowing current results in a volumetric bundle of induced Foucault currents and regions of Peltier heat release by thermoelectric sample which leads to increasing of irreversible heat losses recorded by measuring oscillating loop. The presence of this effect has caused the emergence of ingenious non-invasive method for recording of thermoelectric materials figure of merit.

Ivanchykau A. E., Kisel A. M., Medvedeva A. B., Plebanovich V. I. **Modification of spin-on-glass films properties during the thermal and plasma treatments.**

It is established, that the estimation of quality of a film after various technological operations of IC manufacturing can be realized by means of changing the transmission spectrum of the film. It allows to exclude rejects of ICs caused by breakage of a metal layer.

Dmitriev M. V., Yerimichoy I. N., Panov L. I. **Estimation of the components of monoreinforced glass-ceramics with glass-crystalline matrix.**

This article deals with methods of estimation of volumetric parts and dielectric permittivity of glass, crystalline phase and filler which are realizable in glass-ceramics at different sintering regimes. It allows to predict the part of crystalline phase and estimate the influence of sintering conditions on efficiency of crystal formation.

Droz S. S., Mamedov K. Y., Yampolsky Yu. S. **Dynamic range meter for radiofrequency amplifiers.**

The new measurement setup having increased on 20...30 dB the own dynamic range in comparison with the standard circuit of the dynamic range meter is offered and the rated value of an error bringing by setup in the worst case does not exceed $\pm 2,8$ dB. The measurement setup can be applied also to determinate levels of intermodulation components average power amplifiers and powerful amplifiers of a low-frequency at replacement of the quartz filter on meeting low-frequency the LC-filter and the spectrum analyzer.

ПАМЯТКА АВТОРУ ЖУРНАЛА «ТКЭА»

1. Рукопись должна соответствовать тематике журнала и отличаться прикладной направленностью.

Если результаты получены в смежных областях знаний, необходимо показать их применимость в области интересов журнала.

2. При оценке рукописи редакцию будут интересовать следующие аспекты:

- актуальность темы;
- обоснованность постановки задачи;
- новизна информации (в сравнении с работами предшественников);
- убедительность доказательств;
- правомерность выводов;
- возможность практического применения;
- целесообразность (и адекватность тексту) таблиц, иллюстраций, списка использованных источников;

- строгость терминологии;
- композиция рукописи, в т. ч. оправданность объема.

3. Название рукописи должно быть конкретным и, в то же время, по возможности кратким.

4. Приведите мини-аннотацию до 20 слов, отражающую важнейший результат статьи.

5. Обозначьте разделы рукописи. Выделите выводы (резюме, заключение). Кстати, проверьте себя — насколько согласуются поставленная задача, выводы и название статьи.

6. Единицы измерения всех величин должны отвечать современным требованиям, а использованные символы (и аббревиатуры) должны быть пояснены при первом их употреблении в тексте.

7. При ссылке в тексте на численные значения, формулы и иные фактические данные, заимствованные из книг, следует (для удобства поиска) указывать не только саму книгу, но и страницу (например [2, с. 418]).

8. Список «Использованные источники» формируется в порядке их упоминания в тексте. Желательно избегать ссылок на труднодоступные источники (например на материалы конференций) или на недолговечные (например Интернет). Принятое в журнале описание источников показано на сайте www.tkea.com.ua.

9. Сопроводите рукопись библиографической карточкой на русском и английском языках с аннотацией до 500 печ. знаков. Укажите ключевые слова, а также индекс рукописи по Универсальной десятичной классификации (УДК).

10. Материалы статьи направляйте по e-mail <tkea@optima.com.ua> (размер письма не должен превышать 1 Мб). Если Вы направляете рукопись по почте, приложите запись статьи на CD.

Текст статьи на русском языке набирается в текстовом редакторе Microsoft Word размером 12, без переносов, с интервалом не менее 1,5. Все слова внутри абзаца разделяются только одним пробелом. Правый край текста выравнивать не обязательно. Использование программы Equation допускается только в случаях, когда Word бессилён.

Желательно, чтобы объем иллюстраций не превышал 40% общего объема статьи. Иллюстрации должны быть представлены отдельными файлами. Графики и чертежи следует выполнять в черно-белом (битовом) режиме.

Если рисунки выполнялись в программе CorelDraw или Word, то необходимо представить оригинальные файлы (*.cdt или *.doc). Рисунки, созданные в других программных пакетах, необходимо экспортировать в любой из следующих форматов: PCX, JPG, TIF.

В случае, когда автор не может обеспечить высокое качество рисунка в машинном виде, допускается его выполнение вручную с дальнейшим сканированием в битовом режиме с разрешением 300 dpi.

При подготовке цветных иллюстраций желательно фотографировать объекты на однотонном фоне цифровой камерой. Если проводится сканирование изображений, то его необходимо выполнять с разрешением 300 dpi.

11. Снабдите рукопись сведениями об авторах (фамилия, имя, отчество, ученая степень, место работы, должностное положение, дата рождения, служебный и домашний адреса с указанием почтового индекса, e-mail, телефон, телефакс).

12. Если считаете необходимым, сопроводите статью экспертным заключением о возможности ее публикации в открытой печати.

Издательство «Политехперіодика»



Многолетний издательский опыт и профессионализм

Более чем 30-летний опыт издания научно-технических журналов

Многолетний опыт издания

монографий, сборников статей,

художественной литературы

E-mail: tkea@optima.com.ua, web-сайт: www.tkea.com.ua,
тел. +38 (048)728-18-50, 728-11-89, тел./факс 728-49-46

Высококвалифицированное редактирование, вычитка текстов,
верстка, дизайн

Редактирование научное, техническое, нормативное, литературное

Работа с авторами в интерактивном режиме, в т. ч. по Интернету

Организация и сопровождение печатных работ, обеспечение
их высокого качества

Пишите, звоните, приходите



2-4
червня 2009

ТРЕТЯ
МІЖНАРОДНА
СПЕЦІАЛІЗОВАНА
ВИСТАВКА

Smart House Intelligent Building

ОРГАНІЗАТОР



www.smart-expo.com.ua

МІСЦЕ ПРОВЕДЕННЯ



Виставковий центр «АККО Інтернешнл»
Україна, Київ, пр-т. Перемоги, 40-Б

*Номер готували
Бакуч, Київ, Львів, Мінськ, Одеса,
Сатпаєв, Тбілісі, Чернівці.*



Пишите
Подписывайтесь
Читайте

2(80) 2009