

Технология и конструирование в электронной аппаратуре

Пост экологического контроля автомобилей

К статье
"Экоинформационный
комплекс контроля
транспортных средств"



4-5 2002

ИЮЛЬ — ОКТЯБРЬ

ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Учредитель АО "Нептун"

(Министерство промышленной политики Украины)

2002

Год издания 26-й

Год регистрации 1992

№ 4-5

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

К. т. н. Н. М. Вакив
К. т. н. П. П. Воробийенко
Д. т. н. В. Н. Годованюк
Д. т. н. С. В. Ленков
К. т. н. В. Г. Лукомский
Д. т. н. В. П. Малахов
В. А. Мингалев
К. т. н. В. Ф. Моисеев
К. т. н. В. Б. Ткаченко,
Е. А. Тихонова

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д. т. н. А. Л. Вайнер
Д. т. н. В. Т. Дейнега
Д. т. н. Ю. А. Долгов
Д. ф.-м. н. В. А. Дроздов
К. т. н. И. Н. Еримичой, зам. гл. редактора
К. т. н. А. А. Ефименко,
Д. ф.-м. н. А. Н. Золотко
Д. ф.-м. н. Ф. Д. Касимов
Л. М. Лейдерман, отв. секретарь редакции
Д. т. н. С. Ю. Лузин
К. т. н. Ю. Е. Николаенко
Д. ф.-м. н. В. В. Новиков
К. т. н. В. И. Попов и. о. гл. редактора
К. т. н. В. В. Рюхтин
Д. т. н. Д. А. Сеченов
К. т. н. В. В. Сибириков
Д. ф.-м. н. О. И. Шпютюк

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

Регистрационный номер
КВ 2092 от 07.06.96 г.

Регистрация в ВАК:
Бюллетень ВАК Украины,
1999, № 4

СОДЕРЖАНИЕ

Техническая политика

Производство оптоволоконных материалов и полупроводниковых соединений на Украине. *Ю. В. Трубицын, Д. И. Левинзон* 3
Приборное обеспечение моделирования работы сложных радиоэлектронных устройств. *В. А. Емельянов, В. Н. Пономарь, А. А. Солонинко, Г. Г. Чигирь, Б. Н. Лисенков* 8

Проектирование. Конструирование

Контролепригодные двухканальные логические схемы цифровых компараторов. *А. И. Тимошкин* 11

Электронная аппаратура: исследования, разработки

Влияние γ -излучения на токоперенос в арсенидгаллиевом полевом транзисторе. *Ф. Д. Касимов, А. Э. Лютфалибекова* 13
Влияние теплопереходов на температурный перепад многокаскадной термоэлектрической батареи. *Ю. Е. Николаенко, Л. Н. Вихор* 16
Упрощенный метод измерений при исследовании суперконденсаторов. *З. Стевич, М. Райчич-Вуясинович, З. Стоилькович* 19
Получение структуры цифрового фильтра из описания в пространстве состояний. *В. С. Ситников, П. В. Ступень, И. В. Бадерко* 21

Электроника и экология

Экоинформационный комплекс контроля транспортных средств. *В. Ф. Примиский* 24
Система текущего контроля токсичности выхлопа двигателей транспортных средств. *М. Д. Скубилин, О. Б. Спиридонов* 27

Технология производства

Методика автоматизированного проектирования технологических процессов. *И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, В. А. Макаренко* 29
Технологические средства изготовления микрополосковых линий для ГИС КВЧ-диапазона. *А. Е. Кренделев* 34
Косвенный лазерный нагрев поликристаллического кремния для получения активных элементов микросхем. *З. А. Искендер-заде, Ф. Д. Касимов, С. А. Исмаилова* 40
Регенерируемый цитратный раствор химического никелирования. *Р. Тарозайте, О. Гилене* 43

Датчики

Планарные взаимодуктивные сенсоры для датчиков положения и приближения. *О. Н. Негоденко, С. А. Черевко* 47
Методы уменьшения температурной погрешности датчиков давления. *В. А. Васильев* 50

Материалы электроники

Использование керамики на основе твердых растворов $(\text{Ni}, \text{Co}, \text{Mn}, \text{Cu})_3\text{O}_4$ для толсто пленочных терморезисторов. *О. И. Шпютюк, И. В. Гадзаман, Р. В. Охримович, Н. М. Вакив, С. И. Осечкин, В. М. Цмоць, И. М. Брунец* 55
Степенная связь параметров композиционного материала и его компонентов. *М. В. Дмитриев* 58
Физико-технические параметры монокристаллов для светозвукопроводов акустооптических устройств. *В. В. Данилов* 62

Выставки. Конференции. Симпозиумы 7, 10, 28, 33, 39, 42, 49, 54, 3 с.

Выставки. Конференции. Симпозиумы 7, 10, 28, 33, 39, 42, 49, 54, 3 с. обл.

Науково-технічний журнал

ТЕХНОЛОГІЯ ТА КОНСТРУЮВАННЯ

В ЕЛЕКТРОННІЙ АПАРАТУРІ

(російською мовою)

ЗМІСТ

Технічна політика

Виробництво оптоволоконних матеріалів і напівпровідникових з'єднань в Україні. *Ю. В. Трубіцин, Д. І. Левінзон* (3)

Приладне забезпечення моделювання роботи складних радіоелектронних пристроїв. *В. А. Ємельянов, В. М. Пономар, О. О. Солонінко, Г. Г. Чигир, Б. М. Лисенков* (8)

Проектування. Конструювання

Контролепридатні двоканальні логічні схеми цифрових компараторів. *А. І. Тимошкін* (11)

Електронна апаратура: дослідження, розробки

Вплив γ -випромінювання на струмоперенос в арсенідгалієвому польовому транзисторі. *Ф. Д. Касимов, Г. Е. Лютфалібєкова* (13)

Вплив теплопереходів на температурний перепад багатокаскадної термоелектричної батареї. *Ю. С. Ніколаєнко, Л. М. Віхор* (16)

Спрощений метод вимірювань при дослідженні суперконденсаторів. *З. Стевич, М. Райчич-Вуясинович, З. Стоїлькович* (19)

Отримання структури цифрового фільтру з опису в просторі станів. *В. С. Ситніков, П. В. Ступень, І. В. Бадьорко* (21)

Електроніка та екологія

Екоінформаційний комплекс контролю транспортних засобів. *В. Ф. Приміський* (24)

Система поточного контролю токсичності вихлопу двигунів транспортних засобів. *М. Д. Скубілін, О. Б. Спиридонов* (27)

Технологія виробництва

Методика автоматизованого проектування технологічних процесів. *І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін, В. А. Макаренко* (29)

Технологічні засоби виготовлення мікросмужкових ліній для ГПС КВЧ-діапазону. *О. С. Крендельов* (34)

Непрямий лазерний нагрів полікристалічного кремнію для отримання активних елементів мікросхем. *З. А. Іскендер-заде, Ф. Д. Касимов, С. А. Ісмайлова* (40)

Цитратний розчин хімічного нікелювання, який можна регенерувати. *Р. Тарозайте, О. Гілене* (43)

Датчики

Планарні взаємодуктивні сенсори для датчиків положення та наближення. *О. М. Негоденко, С. О. Черевко* (47)

Методи зменшення температурної похибки датчиків тиску. *В. А. Васильєв* (50)

Матеріали електроніки

Використання кераміки на основі твердих розчинів $(\text{Ni}, \text{Co}, \text{Mn}, \text{Cu})_3\text{O}_4$ для товстошарових терморезисторів. *О. Й. Шпотюк, І. В. Гадаман, Р. В. Охримович, М. М. Ваків, С. І. Осецькін, В. М. Цмоць, І. М. Брунець* (55)

Степеневий зв'язок параметрів композиційного матеріалу та його компонентів. *М. В. Дмитрієв* (58)

Фізико-технічні параметри монокристалів для світловодопроводів акустооптичних пристроїв. *В. В. Данилов* (62)

CONTENT

The technical polytic

Producing of fiber-optical materials and semiconductor compounds in Ukraine. *Trubitsyn Yu. V., Levinzon D. I.* (3)

Simulation of sophisticated radio-electronic devices operation. *Emelyanov V. A., Ponomar V. N., Soloninko A. A., Chigir G. G., Lissenkov B. N.* (8)

Designing. Construction

Dual-link easily testable logical circuits of digital comparators. *Timoshkin A. I.* (11)

Electronic equipment: investigation, developments

Influence of γ -irradiation on the current transport in the GaAs field-effect transistor. *Kasimov F. D., Lyutphalibekova A. E.* (13)

Effect of interstage ceramic plates on temperature drop in thermoelectric cooler. *Nikolaenko Yu. E., Vikhor L. N.* (16)

The simplified measurement method for supercapacitor investigations. *Stevich Z., Raichich-Vujasinovich M., Stoilkovich Z.* (19)

Obtaining of digital filter structure from description in state-space. *Sitnikov V. S., Stupen P. V., Badyorko I. V.* (21)

The electronic and ecology

Ecological-information complex of monitoring of vehicles. *Primiskyy V. F.* (24)

Current control system of toxicity exhaust gases of car engine. *Skubilin M. D., Spiridonov O. B.* (27)

Production technology

Methods of automation designing of technological processes. *Nevludov I. Sh., Palagin V. A., Makarenko V. A.* (29)

The technological means manufacture of microstrip-geometry lines for HIC microwave range. *Krendelov A. E.* (34)

Indirect laser heating of poly-Si films for fabrication of IC's active elements. *Iskender-zade Z. A., Kasimov F. D., Ismailova S. A.* (40)

Electroless nickel plating solution with regeneration. *Tarozait R., Gyliene O.* (43)

Sensors

Planar mutually-inductive sensors for transmitters of position and approaching. *Negodenko O. N., Cherevko S. A.* (47)

Methods of reducing warm-up inaccuracy of pressure sensors. *Vasiljev V. A.* (50)

Materials of electronics

Application of ceramics based on $(\text{Ni}, \text{Co}, \text{Mn}, \text{Cu})_3\text{O}_4$ solid solutions for thick-film thermistors. *Shpotiuk O. I., Gadzaman I. V., Okhrimovich R. V., Vakiv N. M., Osechkin S. I., Tsmots V. M., Brunets I. M.* (55)

The degree's bond parameters of composite material and of its components. *Dmitriev M. V.* (58)

Physical and technical parameters of khalomel, thallium bromide-iodide and bromide-chloride single-crystals. *Danilov V. V.* (62)

колонка редакции

Уважаемый читатель!

Вы получили очередной номер нашего с Вами журнала и мы надеемся, что и в нем Вы найдете полезную для себя информацию.

Понимая, что информация — это не только журнал, редакция по возможности сообщает об известных ей конференциях и активно участвует в организации одной из них — «Современные информационные и электронные технологии» («СИЭТ»). Нам бы хотелось, уважаемый читатель, видеть Вас пользователем и этого информационного канала, видеть Вас участником конференции "СИЭТ", которая в следующем году пройдет в Одессе уже в четвертый раз.

В этом году редакция готовит также рекламно-информационное издание «Украинский проспект электроники» — он тоже для Вас, он должен дать Вам информацию о характере и возможностях украинской электроники, показать новых для Вас потенциальных исполнителей Ваших заказов, потенциальных потребителей Вашей продукции или услуг.

Как всегда, мы ждем Ваших замечаний, пожеланий, беспокойных звонков, если Ваша библиотека вовремя не получила очередной номер. Кстати, о выходе очередного номера Вы можете узнавать на сайте www.tkea.wallst.ru. Там же планируется давать информацию о статьях, готовящихся к печати.

Наша цель — чтобы завтра дела у Вас (а вместе с Вами и у нас) пошли лучше, чем вчера.

Желаем удачи.

Редакция



колонка редакции

Д. т. н. Ю. В. ТРУБИЦЫН, д. т. н. Д. И. ЛЕВИНЗОН

Украина, г. Запорожье, ГНИПИ титана, Гуманитарный университет "ЗИГМУ"
E-mail: niititan@lab1.zssm.zp.ua

Дата поступления в редакцию
25.03 2002 г.

ПРОИЗВОДСТВО ОПТОВОЛОКОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА УКРАИНЕ

Приведен анализ состояния производства и рынка потребления оптоволоконных материалов и полупроводниковых соединений на Украине и в мире.

Оптоволоконные материалы

Сравнительно новым объектом применения хлоридных соединений Si и Ge являются волоконные световоды с малыми оптическими потерями.

Успехи в области химии высокочистых веществ во многом предопределили бурное развитие современных отраслей науки и техники, в частности, волоконно-оптической связи (ВОЛС). Последняя характеризуется высокой пропускной способностью, которая, например, при использовании одномодовых оптических волокон на основе кварцевого стекла составляет несколько гигабит в секунду и отличается низкими потерями, не превышающими 0,5 дБ/км в диапазоне длин волн несущего излучения 1,1 — 1,5 мкм.

Выбор материалов для изготовления волоконных световодов определяется необходимостью удовлетворять одновременно многим требованиям. Это способность вытягиваться в тонкую нить, обладающую высокой прочностью и гибкостью; возможность варьирования в достаточно широком интервале показателя преломления для создания различных типов оптических сред; низкие оптические потери на несущей частоте излучения; высокая радиационная стойкость и т. д. По определяющему набору показателей этим требованиям удовлетворяют кварцевые стекла (SiO_2), легированные оксидами бора, германия и фосфора (B_2O_3 , GeO_2 , P_2O_5).

Требованиям высокой чистоты получаемых оксидов и сохранению этой чистоты во всех технологических операциях, вплоть до получения световода, удовлетворяет газофазный метод получения кварцевого стекла по реакции окисления тетрахлорида кремния. Одновременно для регулирования величины показателя преломления стекла вводятся добавки тетрахлорида германия, трихлорида бора и оксихлорида фосфора. Естественно, что чистота хлоридов и участвующих компонентов, применяемых для получения световодов, в значительной мере определяет высокое качество последних по всем контролируемым параметрам, т. к. они должны относиться к кате-

гории «высокочистые вещества» и соответствовать понятию «высокие технологии». Требования к чистоте хлоридов формулируются, в основном, при изучении механизмов оптических потерь в стекле, поскольку основные механизмы потерь обусловлены примесями в стекле, т. е. не являются собственными.

Метод получения высокочистых веществ через их летучие соединения широко используется в практике. Например, летучие хлориды Si, Ge, P, B, As, Ti являются исходными веществами для получения соответствующих элементов, а также различных их соединений в высокочистом состоянии. Указанные хлориды — это агрессивные и токсичные соединения. Они легко гидролизуются с образованием хлористого водорода и взаимодействуют со многими веществами. В связи с этим их получение в высокочистом состоянии представляет собой достаточно сложную задачу, решение которой возможно с использованием эффективных методов глубокой очистки и при соблюдении необходимых мер безопасности.

Известные отечественные и зарубежные технологии получения высокочистых исходных материалов для производства волоконных световодов многостадийны, а финишные операции требуют применения техники чистых зон и аппаратуры для очистки и осушки инертных газов. Как следствие этого, стоимость указанных материалов на мировом рынке достаточно велика и составляет \$1000 — 3000 за 1 кг в зависимости от типа хлорида.

Для глубокой очистки тетрахлоридов Si и Ge, трихлорида бора и оксихлорида фосфора используются экстракционные, адсорбционные, химические, а также дистилляционные и кристаллизационные методы. Наиболее широкое применение нашел метод ректификации, характеризующийся высокой эффективностью, производительностью и сравнительной простотой аппаратного оформления.

Процесс очистки жидкостей дистилляционными методами обусловлен неравномерным распределением примесей между жидкостью и паром, которое определяется величиной коэффициента разделения. При этом одни примеси концентрируются в жидкой фазе (высококипящие вещества), другие — в паровой (низкокипящие вещества). Следовательно, в процессе ректификации примеси выше- и нижекипящих веществ концентрируются в противоположных концах ректификационной колонны. Для глубокой очистки

Публикуется в порядке обсуждения.

летучих жидкостей целесообразно использовать ректификационные колонны (насадочные, тарельчатые, ситчатые) со средним питающим резервуаром, работающие в периодическом режиме. При этом процесс предпочтительнее проводить, отбирая из колонны не очищаемое вещество, а примеси сверху и снизу колонны. Работа последней в таком режиме исключает загрязнение целевого продукта при случайных отклонениях от требуемых параметров, а также позволяет получить экономию времени и энергии.

Примеси ионов переходных металлов в кварце имеют достаточно интенсивные полосы поглощения, попадающие, главным образом, в рабочий интервал значений длин волн несущего излучения. Причем наиболее интенсивные и широкие полосы поглощения имеют ионы таких элементов как V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni. Остальные переходные металлы имеют более узкие линии поглощения и вносят меньший вклад в величину потерь.

Интенсивность поглощения отдельного химического элемента определяется его концентрацией и степенью его окисления в стекле. Исследованиями установлена взаимосвязь величины поглощения с концентрацией ионов металлов в кварцевом стекле. Однако установление подобных закономерностей осложнено тем, что поглощение, обусловленное атомом отдельного элемента, не только зависит от его концентрации, но и определяется составом кварцевого стекла и технологией его изготовления. Поэтому опубликованные данные о значениях коэффициентов поглощения примесей переходных металлов в стеклах полезны лишь для приближенной оценки их вклада в общий уровень потерь и выработки базовых требований по предельному содержанию примесей в исходных хлоридах кремния, германия, бора и фосфора. Достоверно можно утверждать, что этот уровень должен быть не более 10^{-7} — 10^{-8} мас.дол.%. В настоящее время этой проблемой заняты два отраслевых института — Государственный институт стекла (г. Константиновка) и Государственный научно-исследовательский и проектный институт титана (г. Запорожье).

На основании предварительных исследований можно сделать выводы о том, что предпочтительным технологическим направлением дальнейших исследований по созданию технологии получения оптоволоконного кварцевого стекла в Украине следует считать следующие этапы:

- модернизация существующей технологии получения технического Si карботермическим методом (высший по примесной чистоте Si металлургического качества как исходное сырье для синтеза хлоридных соединений Si полупроводниковой чистоты);

- синтез хлоридных соединений Si высокой чистоты (трихлорид и тетрахлорид кремния (ТК) как исходное сырье для получения кварцевого оптического волокна);

- создание нового направления технологии очистки хлоридных соединений Si от красящих (металлических) и органических примесей для получения оптического кварца (развитие и усовершенствование существующей технологии очистки хлоридных соединений Si уровня полупроводниковой чистоты);

- развитие технологии разделения хлоридных соединений Si с выделением высокочистого ТК в замкнутом цикле обращения химических компонентов;

- развитие технологии получения высокочистого диоксида Si для кварцевого стекла парофазным гидролизом ТК;

- создание технологии легирования специальными добавками на ранних стадиях получения хлоридных соединений кремния для придания кварцевому стеклу заданных оптических характеристик;

- развитие технологии получения тетрахлорида германия и его очистки до уровня требований волоконной оптики.

Необходимой основной опытно-промышленной инфраструктурой и достаточным научно-производственным опытом в получении хлоридов Si и Ge полупроводниковой чистоты (идентичных по некоторым параметрам требованиям ВОЛС) обладает ГНИПИ титана и Запорожский титано-магний комбинат (ЗТМК), в частности, его полупроводниковая площадка, предназначенная для производства монокристаллических Si и Ge по хлоридной и гидридной технологиям. Таким образом, Украина располагает промышленным потенциалом для производства высокочистых химических компонентов технологии получения волоконного стекла на основе оптического кварца. Кроме того, дополнительным положительным моментом развития этого направления является решение проблемы утилизации ТК. При производстве полупроводникового поликристаллического кремния (Сименс-процесс) на 1 мас. дол. основного продукта суммарно образуется 14 мас. дол. ТК.

Как отмечает газета «Financial Times» [1], ежегодные темпы роста мирового рынка ВОЛС в конце 1990-х гг. вполне сопоставимы с соответствующими показателями на первоначальном этапе развития компьютерной индустрии. Одновременно с непрерывным увеличением пропускной способности ВОЛС происходит и снижение удельной стоимости передачи информации. Один из наиболее важных результатов НИОКР в отрасли в конце 1990-х гг. заключается в создании технологического стандарта «ОС 786», который обеспечивает рост пропускной способности до 40 Гбит/с, что в 4 раза превышает соответствующий показатель у современной технологии «ОС 192» последнего поколения.

В настоящее время ведущие фирмы-операторы приступили к внедрению технологии «ОС 786» на своих линиях связи. Совершенствование этой технологии осуществляют все ведущие мировые поставщики средств ВОЛС, в частности, «Lucent Technologies», «Nortel Networks», «Markoni», «Alcatel», «Siemens» и «Ericsson», причем проведенные испытания уже обеспечивают пропускную способность одной нити ВОЛС (толщиной с человеческий волос) в Тбит/с.

Американская компания «Corning» (число занятых — примерно 33 тыс.) является ведущим мировым поставщиком оптического волокна. Удельный вес этой продукции в общих продажах составляет около 70%. Оборот компании в 2000 г., по оценке, равнялся \$7 млрд. (по сравнению с \$4,7 млрд. в предыдущем году), а сегодня этот показатель, как пола-

гают, достигнет \$10 млрд. В конце предыдущего десятилетия удельный вес затрат на НИОКР увеличился с 5 до 8% общего оборота. Инвестиции компании возросли с \$580 млн. в 2000 г. до \$750 млн. в 2001 г. и \$1 млрд. в 2002 г.

“Corning” осуществляет интенсивную перестройку своей деятельности, причем основное внимание уделяет разработке и выпуску продукции для информационных и телекоммуникационных технологий (оптическое волокно, оптоэлектроника, сетевые компоненты, экраны для жидкокристаллических дисплеев). В конце 2000 г. рыночная капитализация “Corning” достигла \$55 млрд., включая покупку отделения “Pirelli” с получением технологии оптоволоконна из ниобата лития с пропускной способностью 40 Гбит/с и отделения “Siemens” по выпуску оптического кабеля. “Corning” придает большое значение повышению эффективности производственных процессов. Согласно ее расчетам, издержки производства оптического волокна на предприятиях компании являются минимальными (на ~50 % ниже по сравнению с конкурентами).

На рынке технического Si, являющегося основным сырьем для производства хлорсиланов [2, 3], существенного изменения цен не наблюдается. Европейский рынок стабилизировался на уровне \$1230—1250 за тонну, а китайские производители удовлетворяются текущими \$780—800 за тонну. Китай в последние годы играет существенную (а во многих случаях и определяющую) роль на мировом рынке многих материалов. Очередное подтверждение этой тенденции представляет собой Si. К сожалению прочих производителей, экспортная политика китайских промышленников характеризуется непропорционально крупными партиями по откровенно демпинговым ценам.

В целом мировой рынок технического Si выглядит достаточно благоприятно для производителей и потребителей. По данным Roskill Information Service [4], в последние годы глобальный спрос на него возрастал со скоростью 2,6% в год, поднявшись от 800 тыс. тонн в 1995 г. до 910 тыс. тонн в 2001 г. Наиболее высокими темпами (порядка 6% в год) при этом расширялся объем потребления Si в химической промышленности. В 2000 г. на него приходилось около 44% спроса. Эта доля и далее будет расти, т. к. потребление Si в традиционной металлургии в последнее время практически не повышается.

Среди производителей технического Si на первое место вышел Китай, совершивший впечатляющий скачок, доведя годовое производство с 25 тыс. тонн в 1985 г. до свыше 400 тыс. тонн в 2000 г. Так как внутренний рынок технического Si в Китае относительно узок, большая часть этого объема (порядка 300 тыс. тонн в 2000 г.) предназначена на экспорт [5]. Динамика мировых поставок технического Si [6] приведена в табл. 1. В табл. 2 показана динамика спроса на технический кремний.

Современная база данных по месторождениям кварца различного генезиса для производства элитного кремния и его производных, которая дает возможность оценить минерально-сырьевую базу Рос-

Таблица 1

Структура поставок технического кремния на мировой рынок, тыс. тонн

Годы	1997	1998	1999	2000
Всего	923	901	925	965
Производство в промышленно развитых странах	684	684	684	724
Экспорт из Китая	200	176	200	200
Экспорт из России	39	41	41	41

Таблица 2

Структура спроса на технический кремний на мировом рынке, тыс. тонн

Годы	1997	1998	1999	2000
Всего	904	873	888	933
Европа	316	318	318	339
Северная Америка	280	272	272	278
Япония	161	150	160	181
Прочие азиатские страны	59	45	50	—
Прочие страны	88	88	88	135

сии и сопредельных стран, включая Украину, приведена в работе [7]. Средне- и низкотемпературные гидротермальные кварцевые жилы, многие из которых содержат хрусталеносную минерализацию, сосредоточены в Кольской, Украинской, Закавказской, Уральской, Казахстанской, Среднеазиатской, Верхоянской, Прибайкальской кварцевых провинциях. Авторами [7] предложена оригинальная методика прогноза обогащаемости любого потенциального сырья для получения высокочистого кварцевого концентрата, что, кстати, говорит о необходимости коренного пересмотра подхода к определению и оценке минерально-сырьевой базы производства кремния и его соединений.

По данным Roskill’s Letter from Japan [8], мировые цены на диоксид германия в период с начала 2001 г. по апрель выросли с \$550—620 за кг до \$700. Наблюдаемый рост обусловлен повышением спроса на тетрахлорид германия со стороны американских и европейских производителей оптических волокон. Тетрахлорид германия (GeCl₄) для оптических волокон производится либо из диоксида германия, либо, что более распространено, из металлического Ge. Поскольку разница в ценах на металлический Ge и диоксид сократилась, американские производители перерабатывают металлический Ge. Японские же производители предпочитают использовать диоксид германия. Потребление тетрахлорида германия в США, где выпускаются оптические волокна, намного превышает соответствующий показатель в Японии, производящей только одномодовые волокна. Суммарное производство оптических волокон в Японии возросло в 2000 г. на 21% — до 9,26 млн. км, и на ближайшее будущее также прогнозируется его значительный рост.

Полупроводниковые соединения

В последнее десятилетие GaAs прочно занял третью позицию в иерархии полупроводниковых материалов по объемам потребления, а исследования в

данной области составляют содержание основного направления развития современной электроники. Темпы роста объема продаж полупроводниковых компонентов на основе гетероструктур A_3B_5 — лазеров, светодиодов, фотоприемников, солнечных батарей, быстродействующих транзисторов в 2000 г. составили 25—30%, для наиболее бурно развивающихся телекоммуникационных лазеров — 60—70%, для отдельных типов полупроводниковых лазеров, таких как лазеры с радиальным выводом излучения, — 100—140%. Это сейчас наиболее бурно развивающаяся отрасль полупроводниковой индустрии на Западе и Востоке [9].

Приборы на основе GaAs многократно превосходят кремниевые приборы по быстродействию, обладают высокой радиационной стойкостью в сочетании со способностью функционировать в широком интервале температур. Уникальным свойством GaAs является непосредственное преобразование электрического сигнала в когерентный свет, которое сегодня эффективно используется в большой гамме приборов — от инжекционных лазеров и фотоэлектронных умножителей до сигнальных светофоров и мобильных телефонов.

Крупнейшим производителем и экспортером полупроводниковых соединений является Япония. Только в 2000 г. количественный рост экспорта составил 29% — 58,2 т. Основным адресатом отгрузок является Тайвань, который становится мировым центром производства светодиодов и на который приходится 44% японского экспорта. Географическая структура японской внешней торговли полупроводниковыми соединениями представлена в табл. 3 [10].

Таблица 3
Динамика и структура японской внешней торговли полупроводниковыми соединениями, млн. цен

Годы	1997	1998	1999	2000
Экспорт, в т. ч. поставки в страны:	17014	17036	19733	28262
Тайвань	8115	7589	8528	12513
США	4842	4937	5128	6347
ФРГ	2051	2119	2245	3129
Сингапур	299	347	1020	1731
Корея	705	813	1376	1652
Прочие страны	1002	1231	1436	2890
Импорт, в т. ч. из стран:	1240	1520	2453	4466
США	864	957	1774	3246
Тайвань	66	78	82	533
Франция	137	192	194	291
Великобритания	131	184	263	142
ФРГ	11	14	24	97
Прочие страны	31	95	116	157

В течение последних 10 лет рынок GaAs стабильно и поступательно идет на подъем при сбалансированных объемах потребления и поставок. Начиная с 2000 г. ситуация на рынке (главным образом, в связи с ростом производства сотовых телефонов) резко изменилась из-за острого дефицита галлия. Оптовые цены на рафинированный галлий, составлявшие в начале 2000 г. около \$500 за кг, буквально взлетели до \$2500 в конце года [11].

Основным источником (90%) получения Ga являются бокситы, около 10% составляют отходы цинкового производства. Черновой Ga получают при переработке бокситов как относительно недорогой в производстве побочный продукт при выпуске глинозема — сырья для производства алюминия. Однако высокочистый Ga можно получить лишь после многостадийного рафинирования, что значительно удорожает конечный продукт.

Вплоть до последнего времени мало кто из производителей глинозема утруждал себя выделением Ga вследствие сложности его очистки и невысокого спроса. Теперь же, в связи с резким скачком спроса на Ga, приходится радикально пересматривать свои позиции. К потенциальным источникам извлечения Ga также относятся фосфатные руды и нефелиновые сиениты (США, Россия, Украина), золы от сжигания углей (Канада, Югославия, США, Украина), щелочные эффузивные месторождения Брокмен (Австралия), золы битуминозных песчаников и сланцев, а также железные руды (КНР).

Согласно оценкам Горного бюро США, на начало 1991 г. количество галлиевых руд (подтвержденных) составляет 424 тыс. т. Ресурсы Ga, исходя из мировых запасов бокситов, можно оценить в 3—4 млн. т со средним содержанием Ga 50 г/т. Текущая региональная структура мирового спроса и производства Ga, постоянно анализируемая компанией «Dowa Mining» (Япония), приведена в табл. 4 [12].

Таблица 4
Динамика и структура мирового спроса и производства Ga, т

Годы	1997	1998	1999	2000	2001
Спрос, в т. ч.:	164	156	175	195	216
Япония	113	101	116	132	149
США	36	38	41	43	46
Европа	9	10	11	12	13
Прочие страны	...	...	...	...	...
Производство, в т. ч.:	164	165	168	187	212
Япония	66	75	73	87	104
СНГ	26	34	33	35	35
Европа	25	30	28	29	35
США	18	20	24	26	28
Прочие страны	18	6	10	10	10

Япония является и крупнейшим в мире потребителем Ga. В 2000 г. на ее долю пришлось около 68% мирового спроса. В 2001 г. потребление Ga в Японии составило 61,8 т. Крупным импортером Ga являются также США. Динамика импорта этого металла характеризуется следующими показателями: 1997 г. — 19,1 т; 1998 г. — 26,3 т; 1999 г. — 26,0 т.

В условиях высокого спроса на GaAs для использования в производстве компонентов сотовых телефонов и компьютеров типа «ноутбук» производители этого соединения в 2001 г. удвоили свои производственные мощности. Рост спроса на Ga обуславливается расширением его потребления в производстве кристаллов GaAs на 26% (до 49 т) и светоизлучательных диодов на основе GaAs на 24% (до 52 т). Кроме

того, повышение спроса на высокочистый Ga продолжится в результате расширения производства мощностей по выпуску монокристаллических подложек на основе GaAs и по изготовлению эпитаксиальных пластин. В указанных сферах потребления спрос повысится соответственно на 20% (до 59 т) и на 19% (до 60 т) [13]. По прогнозу "Dowa Mining", дефицит поставок галлия на мировой рынок составит 8 т, при этом мировой спрос на металл возрастет на 11,4% (до 195 т), а его производство — на 11,3% (до 187 т).

Мировое производство первичного Ga в 2001 г. превысило 90 т, из которых 14 т приходится на Японию, 20 т на Казахстан, 5 т на Китай и 5 т на Венгрию. Николаевский глиноземный завод (Украина) объявил о запуске технологической линии по производству чернового Ga (99,99%) мощностью 10 т/год. 50—60% прироста спроса на Ga будет удовлетворяться за счет вторичного металла. Крупнейшим в мире производителем первичного Ga является компания GEO Specialty Chemicals (США), сделавшая весомую заявку на лидерство в мировом рынке началом строительства в Австралии нового завода стоимостью \$40 млн., который должен войти в строй во втором квартале 2002 г. Производственная мощность этого предприятия составит 100 т/год, что доведет годовой объем выпуска Ga компанией GEO до 133 т [14].

Украина обладает уникальным предприятием — ОАО «Чистые металлы», которое было введено в строй в 1962 г. как основа для создания многопрофильного комплекса по производству двойных и тройных полупроводниковых соединений, а также по очистке ряда металлов (Hg, In, Cd, Te, Zn) до элементарного состояния. В настоящее время, несмотря на прове-

денную реструктуризацию и выделение производств в отдельные дочерние предприятия, комплекс бездействует.

На сегодняшний день, несмотря на значительный опыт и технический потенциал, судьба как электронной промышленности, так и отрасли, производящей полупроводниковые материалы и компоненты, зависит, главным образом, от государственной политики приоритетов, что многократно подтверждалось ходом развития электроники в развитых странах.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. БИКИ, № 49—50, 5.V 2001.
2. Металлы мира. Международное обозрение.— 2000.— № 6.
3. Металлы мира. Международное обозрение.— 2001.— № 1.
4. Металлы мира. Международное обозрение.— 2000.— № 12.
5. Металлы мира. Международное обозрение.— 2001.— № 6.
6. БИКИ, № 78, 28.VII 2001. ЕЕ.
7. Ясаманов Н. А., Юрьев В. А. Новый подход к определению МСБ кварца для производства чистого кремния // Разведка и охрана недр.— 2000.— № 3—4.— С. 17—21.
8. БИКИ, № 77, 12.VII 2001. ЕЕ.
9. "Світ", березень 2001, № 9—10, с. 6.
10. БИКИ, № 89, 9.VIII 2001. ВН.
11. Металлы мира. Международное обозрение.— 2001.— № 6.
12. БИКИ, № 143, 7.XII 2000. ЕЕ.
13. БИКИ, № 26, 10.III 2001. ЕЕ.
14. Металлы мира. Международное обозрение.— 2001.— № 4.

С e B I T - 2 0 0 3

С 12 по 19 марта 2003 года в городе Ганновере, Германия, пройдет очередная выставка CeBIT.

CeBIT — это не только крупнейшая международная специализированная выставка по информационным технологиям, телекоммуникации, услугам и программному обеспечению, это самая крупная выставка в мире вообще. 7500 фирм-экспонентов из 60 стран, 700000 посетителей из 125 стран мира и выставочная площадь более 400000 квадратных метров, одним словом, CeBIT — это больше, чем просто выставка. CeBIT — это уникальное связующее звено между информационными технологиями и телекоммуникацией, отражение мирового рынка, его предложения и спроса. Здесь сконцентрированы практически все существующие приборы, системы, частные и комплексные решения и идеи. Всеобъемлющее предложение и удоб-

ная структура отличают CeBIT от других выставок отрасли.

CeBIT — это не только ежегодная встреча руководителей и экспертов отрасли, на выставку съезжаются ученые, политики и представители прессы со всего мира (около 12000 журналистов из 75 стран).

Структуру выставки определяет интеграция в области обработки данных и информации, телекоммуникации, компьютерных сетей, решений для Интернета и услуг, IT-инжиниринга и технологий безопасности, банковских и карточных технологий, а также научных исследований. Тенденция к интегрированным прикладным решениям во всех отраслях экономики проявляется и на CeBIT: никакая другая выставка не демонстрирует процессы и изменения на рынке и направления будущего развития в таком объеме и взаимосвязи.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ. СИМПОЗИУМЫ

CeBIT — это главная платформа для презентации новых технологий, инноваций, усовершенствований и исследований, что делает ее единственной выставкой по информационным технологиям и телекоммуникации, на которой можно открыть для себя зарождающиеся перспективные рынки.

CeBIT охватывает структуры и элементы, представленные лишь частично на других выставках данной отрасли, либо не представленные вообще. Каждый раздел CeBIT сам по себе является выставкой № 1 по соответствующей тематике. Взятые вместе, эти разделы объединяются в уникальное событие в мире бизнеса.

CeBIT нельзя сравнить с другими выставками, ее невозможно повторить, как невозможно и отказаться от нее, ведь здесь рождаются новые идеи, решения, технологии и продукты.

Д. т. н. В. А. ЕМЕЛЬЯНОВ, к. ф.-м. н. В. Н. ПОНОМАРЬ,
А. А. СОЛОНИНКО, к. т. н. Г. Г. ЧИГИРЬ, Б. Н. ЛИСЕНКОВ

Беларусь, г. Минск, Научно-производственное объединение "Интеграл"
E-mail: belms@belms.belpak.minsk.by

Дата поступления в редакцию
10.04 2002 г.

Оппоненты д. т. н. В. А. ПИЛИПЕНКО
(НПО "Интеграл", г. Минск),
к. т. н. А. А. МЕРЖВИНСКИЙ
(НИИ МП, г. Киев)

ПРИБОРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ СЛОЖНЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Показана возможность эффективного моделирования сложных устройств для различных отраслей радиоэлектронной промышленности с использованием импортного и отечественного оборудования.

Создание современных субмикронных микросхем и ряда других сложных устройств для различных отраслей радиоэлектронной промышленности требует моделирования их работы в различных условиях, включая диапазон температур, напряжение питания и входных сигналов. Модель устройства должна позволять провести ее разработку, оптимизировать конструкцию, обеспечить устойчивое функционирование в различных условиях.

Моделирование работы сложных устройств, содержащих большое количество элементов, базируется на использовании специальных редакторов типа Mentor, Cadance. Данные редакторы позволяют представить сложное устройство в виде соединения большого количества отдельных элементов (транзисторы, диоды, резисторы, конденсаторы). При этом функцию каждого элемента выполняет математическая модель его работы, которая описывает работу элемента и дает значение выходного сигнала при наличии определенного сигнала на входе. Соединение таких элементов в единую схему позволяет анализировать функционирование устройства. Ключевым моментом в решении задачи моделирования является построение модели работы отдельных элементов сложного устройства.

Процедура построения модели элемента (например, транзистора) состоит в следующем:

- измерение в цифровом формате вольт-амперных (ВАХ), вольт-фарадных (ВФХ) характеристик в широком диапазоне токов, напряжений с погрешностью не хуже 0,5%;

- расчет spice-параметров, обеспечивающих построение модели работы и расчетных характеристик элемента, отличающихся от измеренных не более чем на 5%.

Измерение характеристик в цифровом формате (результаты измерений находятся в памяти компьютера) обеспечивает широкие возможности по последующей обработке данных, включая построение графиков в различных координатах, расчет параметров, передачу информации по сетям. Специальное математическое обеспечение ICCAP (в среде UNIX)

обеспечивает возможность обработки экспериментальных данных для решения широкого круга вопросов, связанных с моделированием параметров элементной базы, статистической обработкой данных, графическим анализом, сравнением и оптимизацией. Возможность извлечения spice-параметров обеспечивает построение моделей работы отдельных элементов и устройства в целом.

В отечественном приборостроении измерение параметров в ряде случаев производится с достаточной точностью. Однако имеющиеся приборы не обладают нужной степенью автоматизации процесса измерений, оцифровки результатов, предварительной и финишной обработки данных, накопления и хранения данных, передачи их по локальной сети. В большинстве случаев автоматизация практически отсутствует. Например, одна из наиболее распространенных контрольных операций — операция контроля ВАХ — производится на приборах наблюдения характеристик транзисторов (ПНХТ) типа Л2-56 (производство г. Выборг, Россия). Эти приборы морально устарели. Они базируются на ручном процессе проведения измерений, результаты измерений записываются оператором в рабочий журнал и при оформлении отчета набираются на компьютере. После передачи отчета потребитель не видит "рисунка" ВАХ, т. к. получает таблицу значений. Это не позволяет анализировать тенденции и особенности характеристик. Нет информации о "тонкой" структуре ВАХ. Такой контроль является крайне трудоемким, непроизводительным и совершенно не отражает современных требований науки и производства, сущность которых составляют:

- автоматизированные измерения параметров (по программе);
- накопление результатов измерений в памяти компьютера;
- обработка измеренных данных и передача результатов по сети.

Выполнение этих требований обеспечивает представление данных в форме, удобной потребителю (графики, таблицы, расчет различных, в т. ч. и сложных, параметров), возможность проведения потребителем дополнительного анализа по специальным алгоритмам и программам, выявление "тонкой" структуры ВАХ, расчет spice-параметров транзисторов и др. Такой подход сокращает время и резко увеличивает эффективность анализа.

Переход к субмикронной технологии СБИС невозможен без создания отечественных автоматизированных измерителей ВАХ. Автоматизированные измерители ВАХ зарубежных фирм, в частности, анализатор HP4156В фирмы HP (США) стоит 40—60 тысяч дол. (в зависимости от комплектации), и они в настоящее время не могут быть приобретены отечественными производителями в достаточном количестве.

Аналогичная ситуация и с отечественными измерителями емкости: ручное управление процессом измерений, отсутствие возможности накопления и необходимой обработки данных. Измерители емкости зарубежных производителей полностью компьютеризированы с минимальным участием оператора в процессе измерения и обработки данных. Следует заметить, что потребность в таких автоматизированных измерителях вольт-фарадных характеристик весьма велика, и широкое их применение будет способствовать прогрессу в технологии микросхем.

Имеющийся в настоящее время на НПО «Интеграл» программно-аналитический комплекс обеспечивает возможность построения моделей элементов, описывающих их работу в широком диапазоне условий, с отличием расчетных и измеренных характеристик не более 5%. Комплекс включает измеритель вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик HP-4061А (фирма HP, США), анализатор характеристик HP-4156В (фирма HP, США), микрозондовую систему 7000, рабочую станцию HP-715. Микрозондовая установка обеспечивает локальность контактирования к элементу с линейным размером около 1 мкм.

Комплекс обеспечивает измерение оцифрованных ВАХ, ВФХ элементов в диапазонах:

- ток — 1 фА — 1 А;
- напряжение — 2 мкВ — 200 В;
- разрешение по току — 1 фА, по напряжению — 2 мкВ;
- емкость — 10^{-17} Ф — 20 мкФ.

Режим работы комплекса со встроенным импульсным генератором для исключения нагрева транзистора во время измерения ВАХ и получения корректных характеристик: ± 40 В, 200 мА, длительность импульса от 1 мкс, длительность периода от 2 мкс.

Анализ возможностей приборостроения Республики Беларусь показывает, что, в частности, Минский научно-исследовательский приборостроительный институт (МНИПИ) обладает достаточным научно-техническим заделом для разработки и серийного производства современных автоматизированных измерителей. Ниже приведены характеристики отечественного комплекса для анализа ВАХ электронных компонентов, которые во многом близки характеристикам зарубежного комплекса и достаточны для решения широкого круга задач.

Характеристики комплекса МНИПИ

Диапазон измерения величины тока 1 пА — 200 мА.

Диапазон задания величины напряжения 2 мВ — 120 В.

Диапазон измерения величины напряжения 0,1 мВ — 120 В.

Погрешность задания и измерения параметров 0,5 %.

Напряжение, при котором задается максимальный ток, 10 В.

Мощность источников 2 Вт.

Количество программируемых источников:

- универсальных — 4;
- источников U — 2;
- измерителей U — 2.

Основные функции:

- создание измерительных программ и их сохранение; измерение параметров по программе;
- преобразование параметров по функциям пользователя;

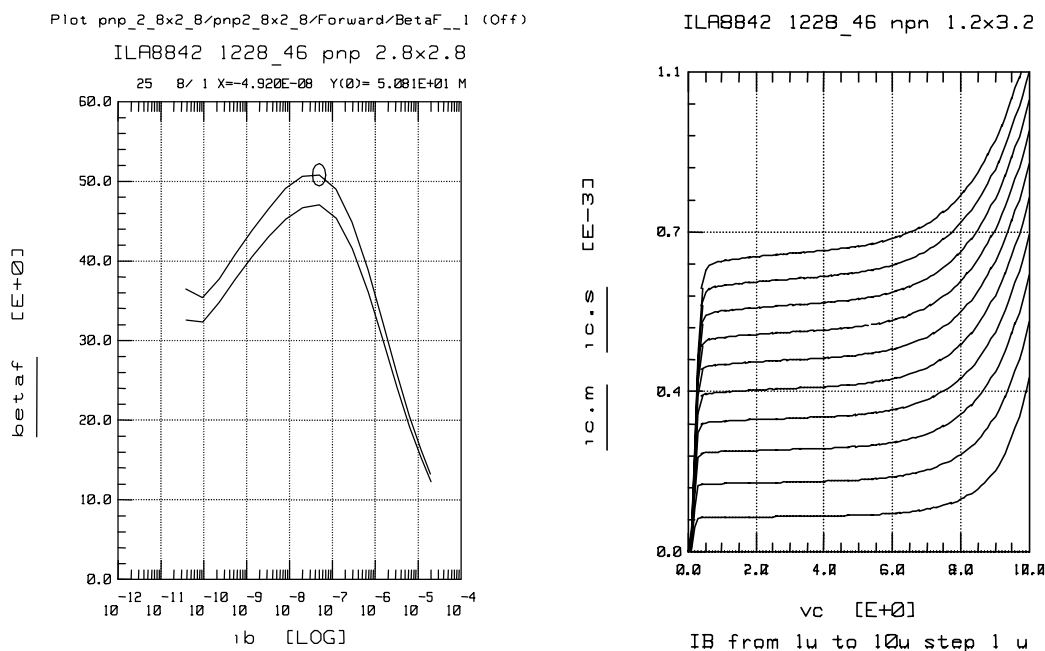


Рис. 1. Зависимость коэффициента усиления биполярного $p-n-p$ -транзистора от тока базы и выходная ВАХ $n-p-n$ -транзистора

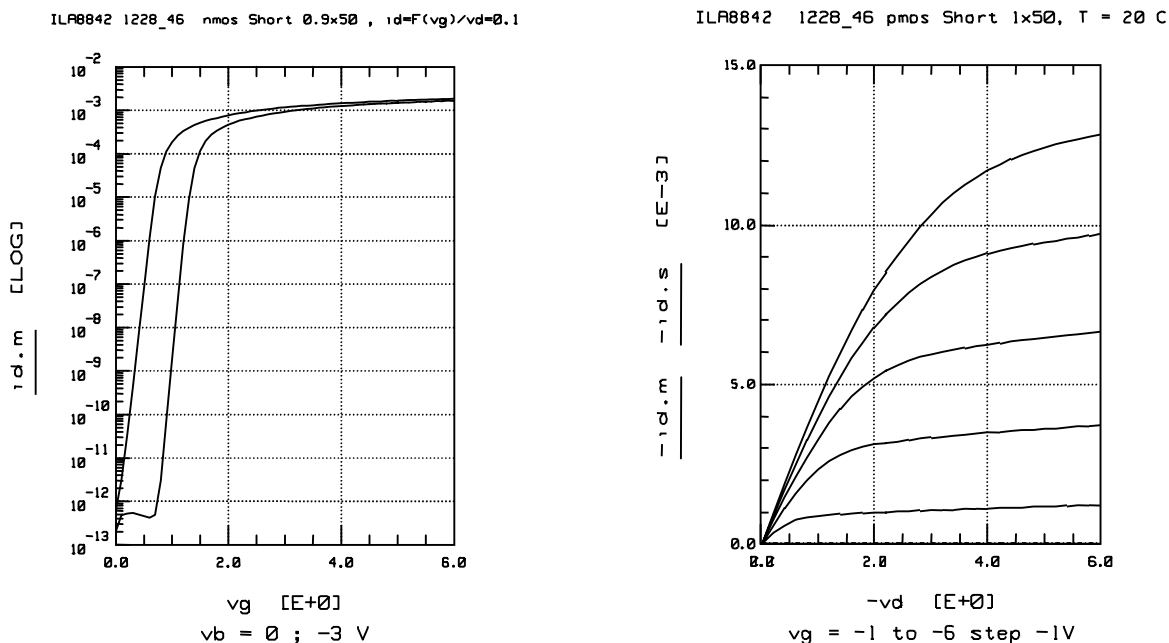


Рис. 2. Допороговая ВАХ NMOS-транзистора и выходная ВАХ PMOS-транзистора

— построение графиков и таблиц на платформе Windows;

— сохранение результатов, передача их по сети.

Стоимость — 10 тыс. дол. США.

Моделирование работы сложных устройств становится особенно актуальным в связи с тенденцией увеличения функциональной сложности устройств и количества элементов в их составе. Так, микросхема синхровидеопроцессора телевизора 7-го поколения ILA8842 изготавливается по субмикронным проектным нормам (0,8 мкм) и является сложным цифро-аналоговым устройством в интегральном исполнении, содержащим 60000 элементов, функцию которого ранее выполняли четыре интегральные схемы и 120 пассивных компонентов.

Успех разработки данной микросхемы обусловлен построением модели ее работы с использованием spice-параметров элементной базы, полученных

на имеющемся в НПО «Интеграл» комплексе, и подтверждает возможность его использования для моделирования сложных устройств для различных отраслей радиоэлектронной промышленности.

На рис. 1, 2 приведены некоторые ВАХ $p-n-p$, $n-p-n$, PMOS- и NMOS- транзисторов, использовавшиеся для экстракции spice-параметров.

Таким образом, проведенные работы позволяют ожидать, что отечественные автоматизированные измерители ВАХ (серийное производство их планируется в 2003 г.) будут иметь приемлемую стоимость и характеристики, и в ближайшее время их можно будет эффективно использовать для моделирования работы элементов. Это позволит сделать работу по моделированию доступной широкому кругу потребителей и снизить стоимость данных работ.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ. СИМПОЗИУМЫ

4-я Международная научно-практическая конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» («СИЭТ—2003»)

пройдет в Одессе 19–23 мая 2003 года.

Предложения по проблематике конференции принимаются по e-mail: <tkea@odessa.net>.



Текущую информацию о «СИЭТ—2003» читайте на web-сайте //www.tkea.wallst.ru/konfer.html

Секретарь Оргкомитета Тихонова Елена Анатольевна

Тел./факс +38 (048)733-67-91,

тел. +38 (048)733-72-83.

К. ф.-м. н. А. И. ТИМОШКИН

Украина, г. Днепропетровск, ГKB «Южное»
E-mail: kbu@public.ua.net

Дата поступления в редакцию
29.10 2001 г. — 14.05 2002 г.

Оппонент к. т. н. А. А. ЧЕРЕВКО
("Электронмаш", г. Киев)

КОНТРОЛЕПРИГОДНЫЕ ДВУХКАНАЛЬНЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ЦИФРОВЫХ КОМПАРАТОРОВ

Разработаны контролепригодные двухканальные логические схемы цифровых компараторов, предназначенные для реализации в виде печатных узлов.

Известно, что функциональный контроль и диагностирование дефектов печатных узлов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) является одной из длительных и трудоемких стадий процесса их производства [1]. Снижение трудоемкости и уменьшение длительности функционального контроля печатных узлов и блоков из них достигается за счет повышения их контролепригодности.

Одним из перспективных подходов к повышению контролепригодности цифровых печатных узлов и блоков РЭА является подход, описанный в [2, с. 208, 209]. Этот подход связан в общем случае с модификацией (как правило, с усложнением) базисных логических элементов и с синтезом контролепригодных логических схем из них.

В данной работе представлены две контролепригодные двухканальные (парафазные) логические схемы цифровых компараторов, синтезированные в рам-

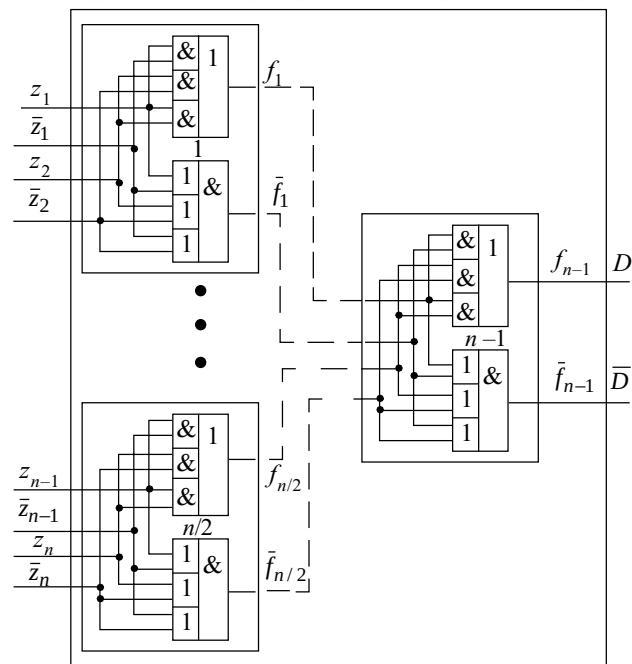


Рис. 1. Схема S_1

ках рассматриваемого подхода и предназначенные для реализации в виде печатных узлов. Для построения этих схем используются специальные функциональные элементы «И» и «ИЛИ» двухканальной логики, которые реализуются в виде отдельных монокристаллических [3, с. 27] интегральных схем. Этими функциональными элементами являются элементы двухканальных схем S_1 и S_2 , заключенные в прямоугольники 1, ..., $n/2$, ..., $n-1$ (где n — четное число), соответственно на рис. 1 и 2. Главная особенность данных элементов, отличающая их от обычных элемен-

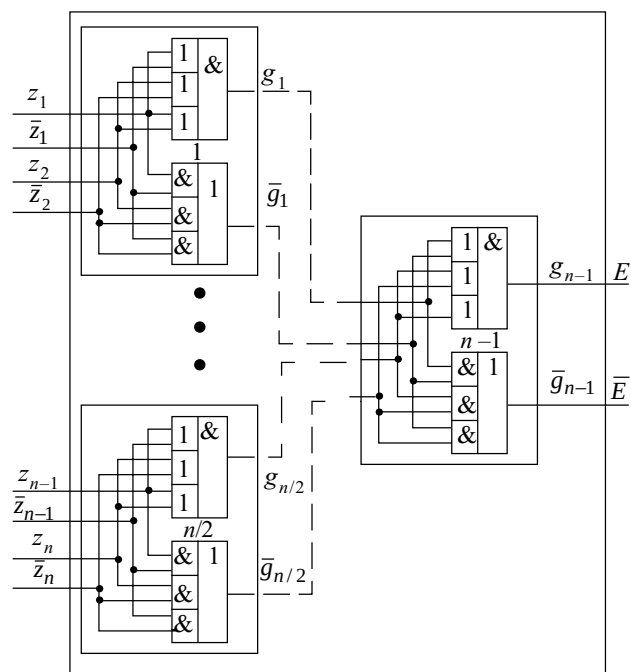


Рис. 2. Схема S_2

тов двухканальной логики [4, с. 81, 82], заключается в том, что они обладают проверяющими тестами длины 2 относительно одиночных и ряда кратных константных неисправностей их входов и выходов. Состав этих тестов одинаков для обоих элементов и описывается табл. 1. Далее эти функциональные элементы будем для краткости называть 2-проверяемыми.

Таблица 1

z_1	$\bar{z}_1$	z_2	$\bar{z}_2$	f_1	$\bar{f}_1$	g_1	$\bar{g}_1$
0	1	0	1	0	1	0	1
1	0	1	0	1	0	1	0

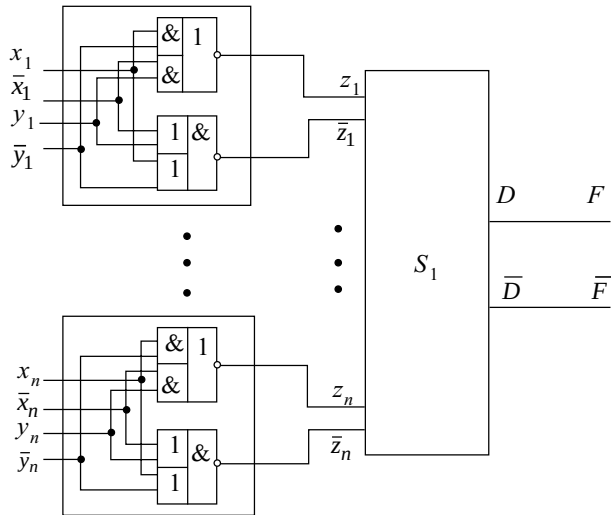


Рис. 3

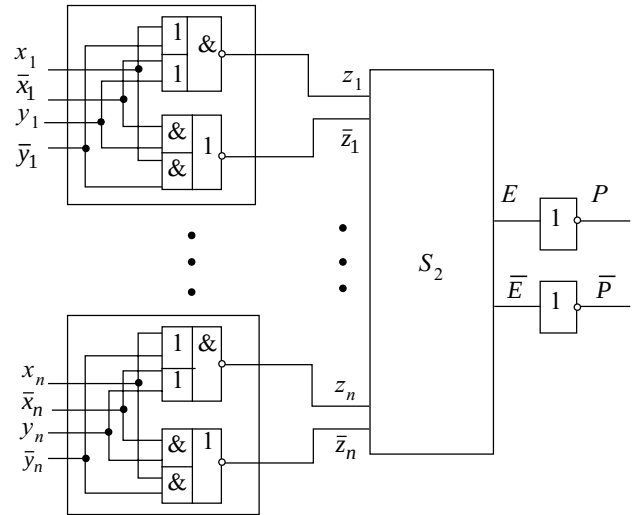


Рис. 4

Необходимые и достаточные условия 2-проверяемости функциональных элементов двухканальной логики относительно одиночных константных неисправностей их входов и выходов, а также древовидных схем из них относительно одиночных константных неисправностей сигнальных линий, были рассмотрены ранее в работе [5]. Древовидные схемы S_1 и S_2 , реализующие зависящие от n пар переменных $(z_1, \bar{z}_1); (z_2, \bar{z}_2); \dots; (z_n, \bar{z}_n)$ функции «И» и «ИЛИ» двухканальной логики, согласно этим условиям, являются 2-проверяемыми относительно одиночных и ряда кратных константных неисправностей сигнальных линий, не принадлежащих их двухканальным элементам. (Двухканальные элементы «И» и «ИЛИ» этих схем, как уже отмечалось, заключены в прямоугольники.) Упомянутые сигнальные линии представляют собой межсоединения печатных узлов. 2-проверяемость схем S_1 и S_2 достигается путем введения тройной избыточности во внутреннюю структуру составляющих их двухканальных элементов «И» и «ИЛИ» (при реализации их по МОП-технологии).

Контролепригодные двухканальные логические схемы цифровых компараторов показаны на рис. 3 и 4. Как видно из рисунков, они получаются путем подключения входов древовидных схем S_1 и S_2 к выходам параллельных блоков из двухканальных элементов «РАВНОЗНАЧНОСТЬ» и «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ», соответственно. Эти элементы реализуются также в виде отдельных интегральных схем. Проверяющие тесты для контролепригодных двухканальных схем цифровых компараторов относительно одиночных и ряда кратных константных неисправностей сигнальных линий, соответствующих межсоединениям печатных узлов, состоят из трех векторов и описываются табл. 2. Эти тесты также обнаруживают более половины неисправностей типа И- и ИЛИ-перемычек межсоединений рассматриваемых печатных узлов.

Таблица 2

x_1	$\bar{x}_1$	y_1	$\bar{y}_1$	...	x_n	$\bar{x}_n$	y_n	$\bar{y}_n$	F	$\bar{F}$	P	$\bar{P}$
1	0	0	1	...	1	0	0	1	0	1	0	1
0	1	1	0	...	0	1	1	0	0	1	0	1
1	0	1	0	...	1	0	1	0	1	0	1	0

В заключение необходимо отметить, что представленные контролепригодные логические схемы цифровых компараторов являются самопроверяемыми относительно одиночных и однонаправленных кратных константных неисправностей межсоединений их печатных узлов, т. к. все отмеченные неисправности проявляются на выходах $F, \bar{F}$ или $P, \bar{P}$ в виде пар значений 00 или 11 на трех входных векторах $x_1, \bar{x}_1, y_1, \bar{y}_1, \dots, x_n, \bar{x}_n, y_n, \bar{y}_n$: 1001 ... 1001, 0110 ... 0110, 1010 ... 1010. (Однонаправленная кратная неисправность — такая кратная неисправность, у которой все ее составляющие одиночные неисправности одного типа: «1» или «0».)

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Лихтциндер Б. Я. Внутрисхемное диагностирование узлов радиоэлектронной аппаратуры. — К.: Техника, 1988.
2. Горяшко А. П. Синтез диагностируемых схем вычислительных устройств. — М.: Наука, 1987.
3. Мурог С. Системное проектирование сверхбольших интегральных схем. — М.: Мир, 1985.
4. Аперидические автоматы / Под ред. В. И. Варшавского. — М.: Наука, 1976.
5. Тимошкин А. И. О реализации некоторых функций двухканальной логики 2-проверяемыми древовидными схемами // Радиопромышленность. — 1994. — № 4. — С. 52—58.

Д. ф.-м. н. Ф. Д. КАСИМОВ, А. Э. ЛЮТФАЛИБЕКОВА

Азербайджан, г. Баку, ОКБ космического приборостроения
E-mail: anasa.ssddb@azeuro.netДата поступления в редакцию
10.01 2002 г.Оппонент к. т. н. В. А. ЗАВАДСКИЙ
(ОНМА, г. Одесса)

ВЛИЯНИЕ γ -ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТОКОПЕРЕНОС В АРСЕНИДГАЛЛИЕВОМ ПОЛЕВОМ ТРАНЗИСТОРЕ

Увеличение тока на несколько порядков в канале арсенидгаллиевого полевого транзистора обусловлено появлением в подложке вторичных токов, сравнимых с токами в пленке.

Разработка приборов для исследования Земли из космоса, проводившаяся в последние десятилетия в Азербайджанском национальном аэрокосмическом агентстве (бывшем НПО космических исследований Главкосмоса СССР), вызвала необходимость повышения радиационной стойкости аппаратуры. В связи с этим возрос интерес к изучению влияния ионизирующего излучения на электрофизические свойства арсенида галлия и на параметры приборов на его основе, поскольку ИС на GaAs обладают более высокой радиационной стойкостью по сравнению с кремниевыми [1, 2].

Под действием ионизирующих излучений в зависимости от их энергии и вида в полупроводниковом материале возникают радиационные дефекты, вследствие чего изменяются его электрофизические характеристики, такие как концентрация свободных носителей заряда, их подвижность, время жизни носителей, диффузионная длина. Для уменьшения таких нежелательных последствий необходимо иметь представление о механизме радиационных нарушений, к которым в основном относятся смещение атомов из узлов решетки и их ионизация [3].

Однако, как известно, одной из основных тенденций в твердотельной электронике является уменьшение толщины пленок, в которых изготавливаются активные элементы ИС [4], и для тонкопленочных структур, в отличие от объемных, не менее важным являются процессы, связанные с подложкой и переходом "пленка—подложка", поскольку действие излучения на них приводит к возникновению дополнительных токов утечек через подложку и эффектам модуляции толщины канала [5].

В кремниевых эпитаксиальных структурах область пространственного заряда (ОПЗ) располагается, в основном, в подложке вследствие ее более высокого удельного сопротивления, и ее роль сводится к высокоомному шунту. В арсенидгаллиевых же подложках, как было нами показано в [6], наличие глубоких ловушек приводит к образованию на границе раздела "пленка—подложка"

$n-v$ -перехода, распространяющегося в пленку, что делает толщину ОПЗ в ней сравнимой с толщиной самой пленки. Расчет модуляции этой области в зависимости от концентрации глубоких ловушек и ее влияние на процессы токопереноса в тонких пленках на полуизолирующей арсенидгаллиевой подложке изучались нами в [7], где было показано, что ею пренебрегать нельзя. Аналогичные процессы могут иметь место и при воздействии ионизирующего излучения (поскольку оно повышает концентрацию дефектов), поэтому исследование влияния токов в подложке, наводимых ионизацией, на токоперенос в эпитаксиальной пленке также имеет важное значение.

При облучении электронным пучком с энергией >15 кэВ каждый попавший на образец электрон создает большое количество электронно-дырочных пар (~ 3500) [8]. Однако экспериментально наблюдавшееся при этом статическое усиление тока превышало 10^7 , что на четыре порядка больше первичного тока, возникающего в структуре за счет генерации электронно-дырочных пар. Следовательно, основной вклад в увеличение тока тонкопленочной структуры при облучении ее электронами вносит вторичный ток.

Следует отметить, что большие вторичные токи, обусловленные модуляцией толщины канала, наблюдаются не только при электронном облучении, но и при воздействии γ -излучения [9].

Для выяснения механизма возникновения вторичного тока нами было проведено моделирование процессов токопереноса в полевоом транзисторе (ПТ) с учетом избыточных носителей заряда и в предположении, что все доноры ионизированы и в материале отсутствуют глубокие ловушки. Последнее условие достигалось введением между пленкой и подложкой буферного слоя, который широко применяется для устранения влияния подложки, препятствуя попаданию электронов из пленки на глубокие ловушки подложки [10]. Концентрация доноров в пленке принималась равной 10^{17} см $^{-3}$, а в подложке — 10^{14} см $^{-3}$, т. е. фактически рассматривался переходный слой "пленка—буфер".

Результаты расчета показали, что в подзатворной области происходит расширение канала в подложку, вследствие чего появляется вторичный ток, который и является причиной экспериментально наблюдаемого высокого усиления тока.

При наличии в структуре p — n -перехода или барьера Шоттки, который служит затвором в ПТ, электронно-дырочные пары, возникающие при облучении, собираются областью объемного заряда перехода, создавая в цепи затвора дополнительный ток:

$$I_g = eq_0 P_v A L_c \quad (1)$$

где e — заряд электрона;

q_0 — коэффициент, характеризующий скорость генерации электронно-дырочных пар (для GaAs $q_0 = 6,63 \cdot 10^{13}$ носитель/(см³рад));

P_v — мощность поглощенной дозы;

A — площадь перехода;

L_c — эффективная длина собирания.

Так как вклад в ток ионизации дают носители, которые возникают на расстоянии, не превышающем диффузионную длину от ОПЗ, то для объемного материала имеет место равенство

$$L_c = d_o + L_p + L_n \quad (2)$$

где d_o — ширина ОПЗ;

L_p и L_n — соответственно диффузионная длина дырок и электронов.

В тонкопленочных структурах эффективная толщина собирания отличается от значения L_c в объемном материале в связи с тем, что генерация электронно-дырочных пар происходит не только в активной пленке, но и в подложке. Наличие n — v -перехода "пленка—подложка" препятствует собиранию дырок — вследствие разделения электронно-дырочных пар. Однако при приложении к затвору такого напряжения, при котором канал становится полностью обедненным, влияние n — v -перехода ослабевает, генерируемые в подложке дырки также собираются на затворе, и ток в его цепи растет.

Токи утечки, возникающие в полуизолирующей подложке с удельным сопротивлением 10^7 Ом·см, экспериментально исследовались при воздействии облучения на ПТ с длиной канала 3 мкм. Результаты измерений, показанные на **рис. 1**, подчинялись полуэмпирической формуле, связывающей ток через подложку с мощностью поглощенной дозы [5]:

$$I_s = kWV_d P_v \quad (3)$$

где k — коэффициент, зависящий от геометрии контактов;

W — ширина контактов;

V_d — напряжение на стоке.

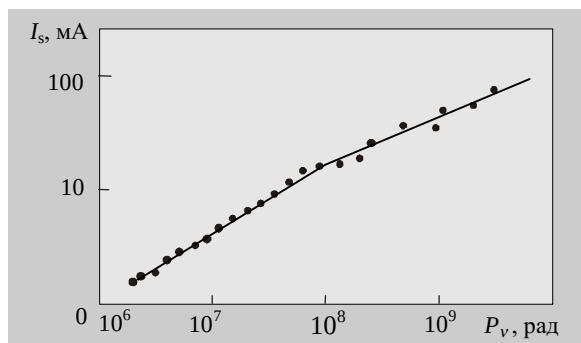


Рис. 1. Зависимость тока, возникающего в полуизолирующей подложке, от мощности поглощенной дозы

Подтверждением того, что измеряемый ток связан с током через подложку, служит тот факт, что зависимость (3) получалась также при расположении контактов на полуизолирующей подложке и в отсутствие проводящего канала — с той лишь разницей, что линейная связь между током и напряжением на контактах имеет место при расстояниях порядка 50 мкм. С этой целью изготавливалась структура, топология которой приведена на **рис. 2**.

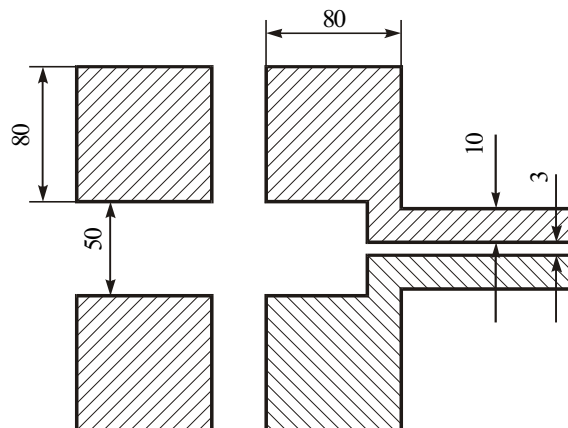


Рис. 2. Топология отдельных и соединенных со стоком и истоком контактных площадок ПТ (размеры в мкм)

Сначала измерялись токи канала на контактах "сток-исток", соединенных с контактными площадками ПТ. Затем проводились измерения на изолированных площадках аналогичной геометрии, расположенных на том же кристалле, не связанных с контактами к областям стока и истока. Путем вычитания этих токов для каждого значения напряжения было получено истинное значение вклада тока, наведенного радиацией в подложке ПТ, на общий ток канала.

Соотношение (3) было справедливо при мощностях поглощенной дозы примерно до 10^8 рад, после чего ток I_s становился пропорциональным $P_v^{1/2}$, что, по всей видимости, связано с нелинейной зависимостью скорости рекомбинации от генерированной концентрации электронно-дырочных пар.

Из анализа литературы известно, что причиной уменьшения радиационной стойкости арсенидгаллиевых нормально закрытых ПТ являются следующие физические процессы:

- генерация электронно-дырочных пар в ПТ и возникновение первичного тока в цепи затвора вследствие собирания носителей;

- генерация носителей в полуизолирующей подложке, что приводит к увеличению ее проводимости и появлению шунтирующего тока между контактами при наличии разности потенциалов;

- модуляция толщины канала, обусловленная разделением носителей на n — v -переходе "пленка—подложка" и захватом дырок на глубокие ловушки в подложке.

Поскольку мы исключили действие глубоких ловушек введением буферного слоя, то специфика

воздействия γ -излучения на тонкопленочные полевые транзисторы в наших экспериментах заключается в появлении вторичных токов через подложку, сравнимых с токами в пленке.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Гаджиев Э. М., Исаев А. А., Касимов Ф. Д. Влияние ионизирующего излучения на параметры арсенидгаллиевых полевых транзисторов // Тр. междунар. науч.-практ. конф. "Современные информационные и электронные технологии".— Одесса, 2001.— С. 302.
2. Джафарова Э. С., Тапдыгов Э. С. Влияние γ -излучения на кремниевые $p-n$ -структуры // Fizika (НАН Азербайджана).— 1999.— Т. 5, № 1.— С. 7—9.
3. Zuleeg R., Lehovec K. Radiation effects in GaAs junction field-effect transistors // IEEE Trans. Nucl. Sci.— 1980.— Vol. NS-27, N 5.— P. 1343—1354.
4. Сеченов Д. А. Нетермическая активация процессов легирования и формирования тонких пленок в технологии ИМС // Тез. докл. Всерос. НТК "Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники". Ч. 2.— Таганрог, 1995.— С. 26.

5. Zuleeg R., Notthoff J. K., Troeger G. L. Channel and substrate current in GaAs FET's due to ionizing radiation // Ibid.— 1983.— Vol. NS-30, N 6.— P. 4151—4156.

6. Гусейнов Я. Ю., Касимов Ф. Д., Кемерчев Г. П. Влияние потенциального барьера на границе раздела полупроводников арсенидгаллиевой подложки с эпитаксиальной пленкой на токоперенос в ней // Fizika (НАН Азербайджана).— 1999.— Т. 5, № 3.— С. 20—22.

7. Касимов Ф. Д., Гусейнов Я. Ю., Кемерчев Г. П. Расчет толщины переходного слоя в арсенидгаллиевых $n-v$ -структурах // Изв. вузов. Электроника.— 2000.— № 3.— С. 100—101.

8. Newman D. S., Ferry D. K., Sites J. R. Measurement and simulation of GaAs FET's under electron-beam irradiation // IEEE Trans. Electron Devices.— 1983.— Vol. ED-30, N 7.— P. 849—855.

9. Long S. I., Lee F. S., Pellegrini P. Pulsed ionizing radiation recovery characteristics of MSI GaAs integrated circuits // IEEE Trans. Electron Devices Lett.— 1981.— Vol. EDI-2, N 7.— P. 173—176.

10. Itoh T., Yanai H. Interface effects on drain current instability in GaAs MESFET's with buffer layer // Jap. J. Appl. Phys.— 1980.— Vol. 19, Suppl. 19-1.— P. 351—355.

в портфеле редакции	в портфеле редакции	в портфеле редакции	в портфеле редакции	в портфеле редакции
➤ Особенности построения бортовых телеметрических систем малых спутников. К. В. Колесник, В. В. Пискорж (Украина, г. Харьков)	➤ Некоторые особенности проектирования высоковольтных КМОП БИС. В. Г. Вербицкий, В. И. Золотаревский, Ю. Е. Николаенко, Л. И. Самотовка, Е. С. Товмач (Украина, г. Киев)	➤ Силовая микросхема для энергоэкономичных блоков управления газоразрядными источниками света. Г. И. Гаврилюк, В. В. Севастьянов, Л. М. Бондарчук, В. В. Чечель (Украина, г. Винница)	➤ Контролепригодная схема двоичного сумматора на основе 16-разрядной группы секций. А. И. Тимошкин (Украина, г. Днепропетровск)	➤ Анизотропный термоэлектрический компаратор. А. А. Ащеулов, И. В. Гуцул (Украина, г. Черновцы)
➤ Расчет оптимальных размеров квантовых точек InSb в матрице GaSb для термофотовольтаических преобразователей. Е. В. Андропова, Е. А. Баганов, А. Ю. Далечин, А. Ю. Карманный (Украина, г. Херсон)	➤ Методика определения динамического диапазона полупроводниковых фотоприемников. И. В. Докторович, В. К. Бутенко, В. Н. Годованюк, В. Г. Юрьев (Украина, г. Черновцы)	➤ Спектральная фоточувствительность Ni—Si:Au-поверхностно-барьерных структур с инжекционным усилением. Ш. Д. Курмашев, И. М. Викулин, С. В. Ленков, В. Г. Сидорец (Украина, г. Одесса)	➤ Получение кремния электродным восстановлением продуктов пиролиза рисовой лузги. И. Е. Марончук, Б. П. Масенко, М. В. Повстяной, В. А. Завадский, О. В. Соловьев (Украина, г. Херсон, Одесса)	➤ Оптимальные схемы лазерных фотоионизационных технологий контроля и очистки вещества на атомном уровне. С. В. Амбросов (Украина, г. Одесса)
➤ Влияние облучения быстрыми нейтронами на эпитаксиальный арсенид галлия. В. А. Завадский, С. В. Ленков, Д. В. Лукомский, В. А. Мокрицкий (Украина, г. Одесса, Киев)	➤ К вопросу о математическом описании кинетики деградации в керамических терморезисторах с отрицательным ТКС. В. А. Балицкая, Н. М. Вакив, О. И. Шпотюк (Украина, г. Львов)	➤ Микронеоднородности поверхности ионнолегированного слоя кремния. И. М. Викулин, Е. Ф. Храмов, Г. В. Прохоров, А. К. Гнап (Украина, г. Одесса, Харьков)	➤ Устройство для проведения электролиза импульсным током. Л. А. Альбота, И. М. Раренко, А. Г. Швеи, И. Л. Альбота (Украина, г. Черновцы)	
в портфеле редакции	в портфеле редакции	в портфеле редакции	в портфеле редакции	в портфеле редакции

К. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО, к. ф.-м. н. Л. Н. ВИХОР

Украина, г. Черновцы, Ин-т термоэлектричества НАНУ
E-mail: vikhor@fromru.com

Дата поступления в редакцию
05.02.2002 г.

Оппонент д. т. н. А. Л. ВАЙНЕР
(НИИ "Шторм", г. Одесса)

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОПЕРЕХОДОВ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПЕРЕПАД МНОГОКАСКАДНОЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ БАТАРЕИ

Исследовано влияние распределения температуры в межкаскадных теплопереводах из различных материалов на полный перепад температур, создаваемый термоэлектрическим охладителем.

Потребность в достаточно эффективных многокаскадных термоэлектрических батареях охлаждения возникает в ряде областей измерительной и электронной техники [1, с. 339—341]. Методам расчета таких термобатарей и исследованию влияния различных факторов на их основные характеристики посвящены работы [2—4]. Оценка поправок, вносимых в характеристики термоэлектрических охладителей (ТЭО) этими различными факторами, проводится здесь на основе приближенных аналитических методов расчета многокаскадных охладителей. Это оказало эффективное влияние на развитие теории каскадных ТЭО.

Пример подхода к оптимизации каскадного ТЭО с учетом современных возможностей компьютерной техники демонстрируется в [5]. Такой подход получил свое дальнейшее развитие в работе [6] для случая использования в каскадных ТЭО неоднородных термоэлектрических материалов. Однако в [5, 6] учет влияния межкаскадных теплопереходов сводится к поправке общего перепада температур на величину фиксированного перепада температур на керамических пластинах. Такое приближение обусловлено используемой здесь одномерной моделью для расчета ТЭО. Его можно считать вполне удовлетворительным на этапе решения такой сложной задачи как проектирование оптимального каскадного ТЭО. После этого целесообразно уточнить характеристики спроектированного модуля охлаждения, учитывая как можно более точно влияющие на них факторы. При этом следует ориентироваться на разработку численного метода расчета.

Настоящая работа посвящена численному решению задачи теплопроводности для многокаскадного ТЭО, количественному анализу распределения температуры в межкаскадных теплопереводах из традиционно используемых материалов и исследованию зависимости температуры охлаждения от параметров этих теплопереходов.

Модель N -каскадного охладителя, используемая для расчета, представлена на рис. 1. Ввиду того, что области теплопереходов I и II находятся при различных граничных условиях, то в теплопере-

ходах возникает не только продольная (вдоль оси z) компонента градиента температуры, но и две поперечные. Этот факт приводит к трехмерной зависимости температуры в теплопереводах от координат x, y, z . Из конструктивных соображений поверхности каскадов термобатарей чаще всего имеют квадратную форму. В этом случае, учитывая, что коэффициенты теплопроводности материалов теплопереходов и каскадов — изотропные величины, решение трехмерной задачи теплопроводности вводом цилиндрических координат приближенно можно свести к двумерной, т. к. температура не зависит от угловой переменной.

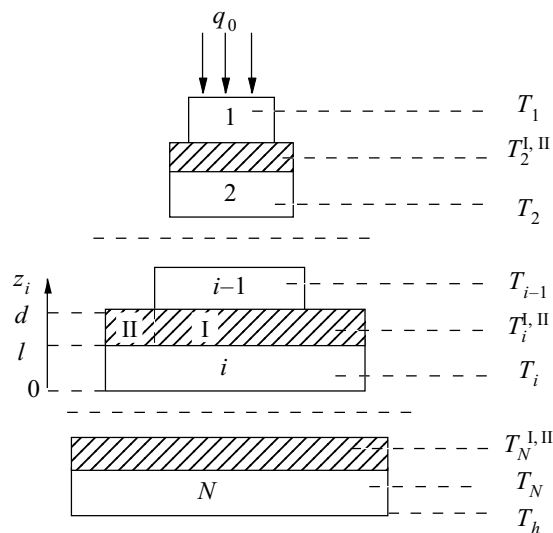


Рис. 1. Модель N -каскадного ТЭО

Ввиду сделанных предположений стационарное распределение температур $T_i^{I,II}(r, z_i)$ в областях теплопереходов I и II задается системой уравнений Лапласа в цилиндрических координатах

$$\frac{1}{r} \frac{\partial T_i^{I,II}(r, z_i)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_i^{I,II}(r, z_i)}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T_i^{I,II}(r, z_i)}{\partial z_i^2} = 0, \quad i = 2, 3, \dots, N, \quad (1)$$

причем в уравнении для области I координата r изменяется в интервале $0 < r < R_{i-1}$, а для области II $R_{i-1} < r < R_i$, где d — высота теплоперевода; l — высота термоэлементов; R_i — радиус теплоперевода i -го каскада.

Распределение температуры в n - и p -ветвях термоэлементов каждого каскада $T_i^{n,p}(z_i)$ можно при-

нять одномерным, зависящим только от координаты вдоль высоты ветвей, и задать уравнением теплопроводности с источниками тепла Джоуля и Томсона в виде

$$\frac{d}{dz_i} \kappa(T) \frac{dT_i}{dz_i} + jT_i \frac{d\alpha(T)}{dT} \frac{dT_i}{dz_i} + \frac{j^2}{\sigma(T)} = 0 \Bigg\}_{n,p}, \quad i=1, \dots, N, \quad (2)$$

где $0 < z_i < l$, параметры термоэлектрического материала термоэдс $\alpha(T)$, теплопроводность $\kappa(T)$, электропроводность $\sigma(T)$ являются функциями температуры, j — плотность тока питания в ветвях термоэлементов. В (2) для n - и p -типов ветвей под j и α подразумеваются их абсолютные значения.

Плотности тепловых потоков на тепловыделяющих (q^h) и теплопоглощающих (q^c) спаях термоэлементов i -го каскада определяются выражениями

$$q_i^h = \sum_{n,p} \left[-\kappa \frac{dT_i}{dz_i} - \alpha j T_i - j^2 r_0 \right]_{z_i=0}; \quad (3)$$

$$q_i^c = \sum_{n,p} \left[-\kappa \frac{dT_i}{dz_i} - \alpha j T_i + j^2 r_0 \right]_{z_i=l}, \quad (4)$$

где r_0 — величина контактного сопротивления.

Для определения характеристик охлаждения систему дифференциальных уравнений (1), (2) необходимо решить при выполнении следующих граничных условий:

1) баланс тепла на теплопоглощающих спаях первого каскада

$$q_0 = -q_1^c, \quad (5)$$

где q_0 — плотность тепловой нагрузки на ТЭО, которая создается охлаждаемым объектом;

2) условия теплообмена на поверхности теплопереходов $z_i = d$:

$$\begin{aligned} \kappa_{cer} \frac{\partial T_i^I}{\partial z_i} \Bigg|_{z_i=d} &= -q_{i-1}^h, \quad 0 < r < R_{i-1}; \\ \kappa_{cer} \frac{\partial T_i^{II}}{\partial z_i} \Bigg|_{z_i=d} &= H(T_a - T_i^{II}(r, d)), \quad R_{i-1} < r < R_i, \end{aligned} \quad (6)$$

где κ_{cer} — коэффициент теплопроводности материала теплоперехода;

H — коэффициент теплообмена с окружающей средой;

T_a — температура окружающей среды;

3) тепловой баланс в области контакта теплопоглощающих спаев термоэлементов i -го каскада с поверхностями теплопереходов $z_i = l$:

$$\begin{aligned} \kappa_{cer} \frac{\partial T_i^I}{\partial z_i} \Bigg|_{z_i=l} &= -q_i^c, \quad 0 < r < R_{i-1}; \\ \kappa_{cer} \frac{\partial T_i^{II}}{\partial z_i} \Bigg|_{z_i=l} &= -q_i^c, \quad R_{i-1} < r < R_i; \end{aligned} \quad (7)$$

4) условия равенства температур на теплопоглощающих и тепловыделяющих спаях термоэлементов:

$$\begin{aligned} T_i^n(l) &= T_i^p(l) = T_i^I(r, l), \quad 0 < r < R_{i-1}; \\ T_i^n(l) &= T_i^p(l) = T_i^{II}(r, l), \quad R_{i-1} < r < R_i; \\ T_{i-1}^n(0) &= T_{i-1}^p(0) = T_i^I(r, d), \quad R_{i-1} < r < R_i; \end{aligned} \quad (8)$$

5) условия адиабатической изоляции боковой поверхности теплоперехода и отсутствия поперечного теплового потока на оси его симметрии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_i^{II}}{\partial r} \Bigg|_{r=R_i} &= 0, \quad l < z_i < d; \\ \frac{\partial T_i^I}{\partial r} \Bigg|_{r=0} &= 0, \quad l < z_i < d; \end{aligned} \quad (9)$$

6) непрерывность теплового потока и равенство температур на поверхности раздела областей теплоперехода I и II:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_i^I}{\partial r} \Bigg|_{r=R_{i-1}} &= \frac{\partial T_i^{II}}{\partial r} \Bigg|_{r=R_{i-1}}, \quad l < z_i < d; \\ T_i^I(R_{i-1}, z_i) &= T_i^{II}(R_{i-1}, z_i), \quad l < z_i < d \end{aligned} \quad (10)$$

(условия (6) — (10) должны быть записаны для $i = 2, \dots, N$);

7) условия термостатирования (T_h) тепловыделяющих спаев последнего каскада —

$$T_N^n(0) = T_N^p(0) = T_h. \quad (11)$$

Система дифференциальных уравнений (1) и (2) с граничными условиями (5) — (11) может быть эффективно решена численно с помощью метода конечных разностей [7].

Суть метода заключается в построении разностной схемы для системы исходных уравнений с учетом граничных условий. Значения производных, входящих в уравнения (1), (2) и в граничные условия, выражаются через значения функций в узлах двухмерной сетки, построенной в рассматриваемой области, в результате чего получается система алгебраических уравнений, называемая разностной схемой.

Компьютерное решение этой системы позволяет определить значения сеточных функций в узлах сетки, которые приближенно считаются равными значениям искомых функций.

Предложенный численный метод использован для расчета распределения температуры в межкаскадных теплопереходах и в ветвях термоэлементов четырехкаскадного ТЭО для фотоприемника, который имеет следующую конструкцию: высота ветвей термоэлементов $l = 0,14$ см, площадь поперечного сечения $0,07 \times 0,07$ см, зазор между кристаллами $0,04$ см, количество термоэлементов в каскадах $n_1 = 6$, $n_2 = 11$, $n_3 = 26$, $n_4 = 64$. Величина коэффициента теплообмена соответствовала работе ТЭО в вакууме порядка $10^{-2} \div 10^{-3}$ мм рт. ст., сопротивление контактов принималось равным $5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см², температура тер-

мостабилизации тепловыделяющих спаев $T_h=300$ К, тепловая нагрузка со стороны охлаждаемого объекта составляла 80 мВт.

Исследовалось распределение температур в межкаскадных теплопереходах различной толщины, выполненных из окиси бериллия, нитрида алюминия и керамики ВК96. Цель исследований – количественно оценить перепад температуры на теплопереходах из этих материалов и его влияние на температуру охлаждения.

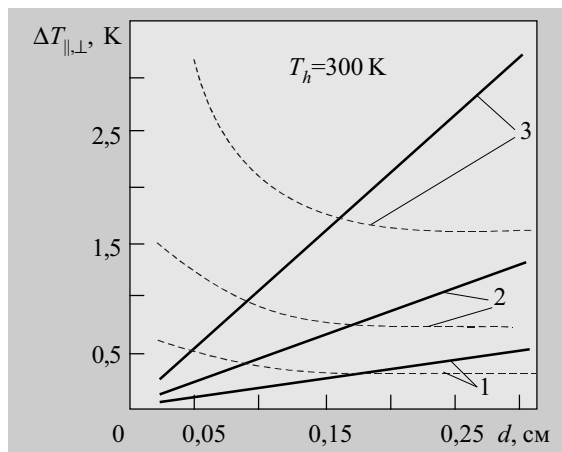


Рис. 2. Зависимости продольного $\Delta T_{||}$ (сплошные линии) и поперечного $\Delta T_{\perp}$ (пунктирные линии) градиентов температуры от высоты теплопереходов из разных материалов: 1 — окись бериллия; 2 — нитрид алюминия; 3 — керамика ВК96

Примеры зависимостей продольного $\Delta T_{||} = T_2^I(0, d) - T_2^I(0, l)$ и поперечного $\Delta T_{\perp} = T_2^{II}(R_1, d) - T_2^{II}(R_2, d)$ градиентов температуры от высоты d теплоперехода между первым и вторым каскадами ТЭО для различных материалов приведены на рис. 2. Расчет показывает, что поперечный и продольный перепады температуры в керамических пластинах между каскадами сравнимы по величине, а значит, в равной мере влияют на снижение общего перепада температур ТЭО. При типичной толщине керамических пластин 1—2 мм перепады температуры на теплопереходах из окиси бериллия и нитрида алюминия не превышают 1 К, а на керамике ВК96 достигают 2 К. Эти значения могут быть рекомендованы в качестве исходных данных для учета потерь в перепаде температуры в керамических пластинах при проектировании оптимальных конструкций каскадных ТЭО.

В силу того, что с ростом высоты теплопереходов продольный градиент растет, а поперечный падает, существует оптимальная высота, при которой полный перепад температуры, обеспечиваемый ТЭО данной конструкции, достигает максимального значения. Этот результат иллюстрируется зависимостью температуры охлаждения $T_c \equiv T_1(l)$ от высоты теплопереходов (рис. 3). Оптимум приходится на высоту теплопереходов, приблизительно равную 0,2 см. Результаты показывают, что в случае теплопереходов из материалов с высокой теплопроводностью (окись бериллия, нитрид алюминия) изменение высоты в интервале

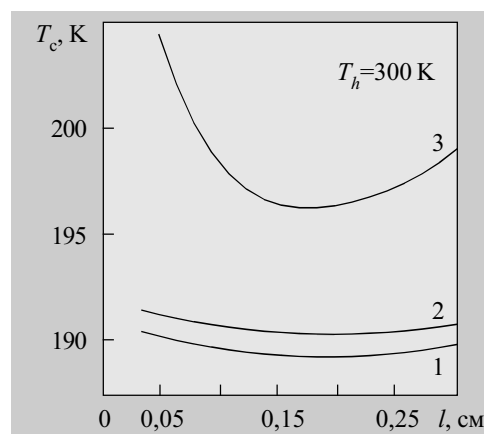


Рис. 3. Зависимости температуры охлаждения T_c от высоты теплопереходов из разных материалов: 1 — окись бериллия; 2 — нитрид алюминия; 3 — керамика ВК96

0,05—0,3 см не приводит к заметному уменьшению полного перепада температуры ТЭО. Для керамики пластин ВК96 этот интервал сужается до 0,1—0,25 см. Глубина охлаждения существенным образом зависит от теплопроводности материала теплопереходов. Расчетная температура охлаждения ТЭО при использовании теплопереходов из окиси бериллия составляет 189 К. Замена этой керамики на нитрид алюминия повысит эту температуру приблизительно на 1 К, а применение ВК96 — на 7 К.

Проведенный количественный анализ влияния теплопереходов на температуру охлаждения может быть использован при разработке новых конструкций каскадных ТЭО для электронной аппаратуры. Предлагаемый уточненный метод расчета характеристик каскадного ТЭО фиксированной конструкции может быть полезен при поиске новых нетрадиционных материалов как для термоэлементов, так и для теплопереходов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Справочник по инфракрасной технике. Т. 3. Приборная база ИК-систем / Под ред. У. Волф, Г. Цисис.— М.: Мир, 1999.
2. Бурштейн А. И. Физические основы расчета полупроводниковых термоэлектрических устройств.— М.: Физматгиз, 1962.
3. Вайнер А. Л. Каскадные термоэлектрические источники холода.— М.: Сов.радио, 1976.
4. Анатычук Л. И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства.— К.: Наукова думка, 1979.
5. Анатычук Л. И., Семенюк В. А. Оптимальное управление свойствами термоэлектрических материалов и приборов.— Черновцы: Прут, 1992.
6. Anatychuk L. I., Luste O. J., Vikhor L. N. Optimal functions as effective method for thermoelectric devices design / In Proceedings of the 15 International Conference on Thermoelectrics.— Pasadena, CA USA, March 26 — 29, 1996.— P. 223 — 226.
7. Турчак Л. И. Основы численных методов. — М.: Наука, 1987.

К. т. н. З. СТЕВИЧ, д. т. н. М. РАЙЧИЧ-ВУЯСИНОВИЧ,
д. т. н. З. СТОИЛЬКОВИЧ

Югославия, Белградский университет (г. Белград, г. Бор)
E-mail: zstevic@ptt.yu

Дата поступления в редакцию
25.06 2002 г.

Оппоненты

д. т. н. Й. РАДУНОВИЧ (Белградский университет),
Г. В. ТРИФОНОВА (Завод "Катион", г. Хмельницкий)

УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ

Предложенные методы могут быть использованы для предварительного получения параметров и последующего выбора оптимальной электрохимической системы.

В современной электронике и энергетике конденсаторы очень больших емкостей (суперконденсаторы) находят все более широкое применение. Конденсаторы с графитовой основой, емкость которых достигает нескольких сотен фарад [1], стали довольно распространенными в производстве, а в последнее время в качестве базовых материалов активно исследуются также и такие соединения как, например, RuO_2 , Co_3O_4 , NiO_2 , IrO_2 и др. [2, 3].

На протяжении ряда лет авторы статьи изучали поведение сульфида меди в электролитическом растворе. Рассматривалась также возможность создания нового класса суперконденсаторов на основе этих систем, в которых обнаружена сверхвысокая емкость [4, 5]. В настоящей работе проведены сравнительные исследования промышленных суперконденсаторов и предложенных нами систем.

Авторами разработаны математическая модель и метод определения необходимых параметров таких электрохимических систем [4], однако здесь использованы более простые методы — для быстрого определения основных параметров суперконденсаторов (емкости и внутреннего сопротивления). Для дальнейшей оптимизации выбранной системы "сульфид меди—электролит" остальные ее параметры можно определять более сложными способами.

Проведенные исследования электрохимических систем на основе сульфида меди показали, что самую большую емкость, по сравнению с другими сульфидами меди, имеют халькозин и ковеллин. Поэтому дальнейшие исследования были ограничены изучением свойств этих двух минералов. Ковеллин является сульфидным минералом меди, по своим химическим свойствам он очень близок к соединению CuS . Этот минерал относится к полупроводникам p -типа, но его удельное сопротивление достаточно мало (порядка 10^{-6} Ом·м). Халькозин — медный минерал, который отвечает соединению Cu_2S . Он также является полупроводником p -типа с достаточно малым удельным сопротивлением (порядка 10^{-3} Ом·м) [6, с. 39; 7, с. 6].

В качестве электролита был использован водный раствор H_2SO_4 , иногда с добавлением CuSO_4 . В качестве обратимого электрода использован платиновый электрод [7, с. 325].

Из-за большого внутреннего (последовательного) сопротивления исследуемых систем стандартный и чаще всего употребляемый метод зарядки и разрядки постоянным током [8] оказался непригодным для измерения емкости. С другой стороны, при классическом и модифицированном гальваностатическом методе [4] требуется сложная процедура вычисления емкости. В связи с этим был применен способ, состоящий из фазы зарядки постоянным током и фазы разрядки через постоянное сопротивление.

Сопротивление разрядки должно быть минимум в 10 раз больше, чем внутреннее сопротивление электрохимической системы, чтобы значение емкости было как можно точнее определено по формуле разрядки конденсатора (при этом внутреннее сопротивление не учитывается):

$$u = U_0 \exp(-t/R_p C), \quad (1)$$

где u — напряжение конденсатора, В;

U_0 — начальное напряжение, В;

t — время, с;

R_p — сопротивление разрядки, Ом;

C — емкость конденсатора, Ф.

Для более точного измерения можно взять сопротивление разрядки в 100 раз большее, чем ориентировочное значение внутреннего сопротивления, которое известно из проведенных ранее экспериментов. Или же в уравнение разрядки вместо R_p подставить сумму $R_p + R_v$, где R_v — внутреннее сопротивление (определяется по [4]).

Постоянную времени $\tau = R_p C$ можно определить графическим путем (см. рис. 1). Она соответствует интервалу с началом в точке пересечения вертикали, отвечаю-

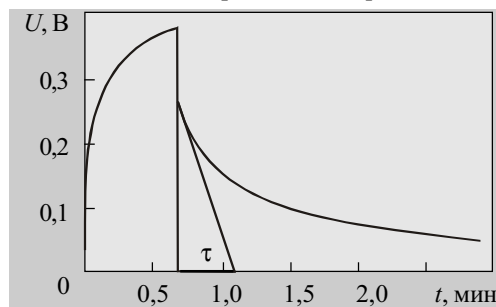


Рис. 1. Экспериментальная кривая зарядки и разрядки

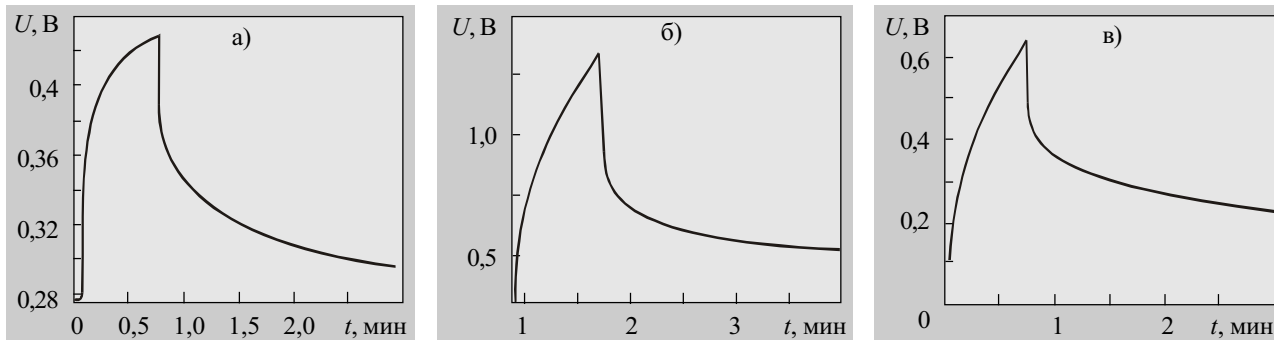


Рис. 2. Кривые зарядки и разрядки экспериментальных систем на основе халькозина (а), ковеллина (б) и промышленного суперконденсатора (в)

щей падению напряжения на внутреннем сопротивлении, и осью t , и концом в месте пересечения касательной, проведенной к началу кривой разрядки, с осью t .

Получая таким же образом кривую, как и на рис. 1, но без резистора, который служит для разрядки R_p , можно определить временную постоянную $\tau_c = R_c C$. Здесь R_c – сопротивление саморазрядки (Ом), которое можно легко рассчитать из формулы

$$R_c = \tau_c / C. \quad (2)$$

Зная сопротивление саморазрядки и известное начальное напряжение U_0 , можно рассчитать удельный ток саморазрядки (А):

$$I_c = U_0 / R_c. \quad (3)$$

Был проведен ряд экспериментов над различными системами. В качестве источника гальваностатических импульсов был использован гальваностат-потенциостат “AMEL”, а для построения кривых зарядки и разрядки применялась измерительная система, разработанная на Техническом факультете (г. Бор) Белградского университета. Система выполнена на базе персонального компьютера и аналого-цифрового конвертора “Analog Devices”, программная часть которой также является авторской разработкой.

Основные характеристики промышленного суперконденсатора и испытанных систем на базе сульфидов меди

Характеристика	На основе халькозина	На основе ковеллина	Промышленный суперконденсатор
Удельная емкость, $\Phi/\text{см}^2$	1	0,2	1
Удельный ток саморазрядки, $\text{мкА}/\text{см}^2$	11	400	0,1
Внутреннее сопротивление, Ом	16	112	0,1

На рис. 2 приведены кривые зарядки и разрядки исследованных систем на основе халькозина и ковеллина в растворе H_2SO_4 , а также промышленного суперконденсатора на 1 Φ (MGC, Япония).

Средние результаты расчета основных характеристик исследованных систем и промышленного суперконденсатора приведены в таблице.

Пример расчета основных характеристик системы с халькозиновой основой

Сопротивление разрядки $R_p = 300$ Ом, ток $I = 0,1$ мА, площадь электрода $S = 0,25$ см^2 .

Расчет производится в следующем порядке.

Из графика рис. 2, а определяем значение $\tau = 79$ с; $U_0 = 0,39$ В. Емкость конденсатора равна: $C = \tau / R_p = 79 / 300 = 0,26$ Φ . Удельная емкость равна: $C' = C / S = 0,26 / 0,25 = 1,04$ $\Phi/\text{см}^2$.

Из графика саморазрядки берем значение $\tau_c = 36100$ с. Сопротивление саморазрядки равно: $R_c = \tau_c / C = 36100 / 0,26 = 139$ кОм. Ток саморазрядки равен: $I_c = U_0 / R_c = 0,39 / 139000 = 2,8$ мкА. Удельный ток саморазрядки: $I'_c = I_c / S = 2,8 / 0,25 = 11,2$ мкА/ см^2 .

Сравнение с результатами, полученными другими, более точными методами, подтверждает, что предложенные методы определения могут быть использованы для предварительного получения параметров и последующего выбора оптимальной электрохимической системы.

Полученные результаты показали, что системы на базе сульфидов меди представляют собой основу для суперконденсатора нового типа.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Arbizzani C., Mastragostino M., Soavi F. Electrode optimisation for carbon power supercapacitors // J. of Power Sources.— 2001.— Vol. 100, N 1.— P. 164—169.
2. Mahon P. J., Paul G. L., Keshishian S. M., Vassallo A. M. Measurement and modeling of the high-power performance of carbon-based supercapacitors // Ibid.— 2000.— Vol. 91, N 2.— P. 68—76.
3. Zheng J. P., Cygan P. J., Jow T. R. An impedance study of the RuO_2 / electrolyte interface // J. Electrochem. Soc.— 1995.— Vol. 142, N 4.— P. 2699—2705.
4. Rajčić Vujasinović M., Stanković Z., Stević Z. The consideration of the electrical circuit analogous to the copper or coppersulfide/electrolyte interfaces based on the time transient analysis // Elektrokhimiya (Moskva).— 1999.— Vol. 35, N 3.— P. 347—354.
5. Stević Z., Rajčić Vujasinović M., Stanković Z. Copper sulfides as a potential material for electrochemical supercapacitors / October conf.— Yugoslavia, D. Milanovac.— 2000.— P. 325—328.
6. Koch D. F. A. Electrochemistry of sulfide minerals // Modern Aspects of Electrochemistry.— 1975.— Vol. 10 (Ed. J. O. M. Bockris, B. E. Conway), chapt. 4.— New York: Plenum Press.
7. Rajčić Vujasinović M., Stanković Z. Elektrohemija sulfidnih minerala bakra i pirita.— Bor: Tehnički fakultet, 2000.
8. Pell W. G., Conway B. E., Adams W. A., Oliveira J. Electrochemical efficiency in multiple discharge/recharge cycling of supercapacitors in hybrid EV applications // J. of Power Sources.— 1999.— Vol. 80, N 1—2.— P. 134—141.

К. т. н. В. С. СИТНИКОВ, П. В. СТУПЕНЬ, И. В. БАДЁРКО

Украина, Одесский нац. политехнический университет
E-mail: sitnv@promel.ospu.odessa.uaДата поступления в редакцию
12.09 2001 г. — 20.02 2002 г.Оппонент
д. т. н. В. П. БОЮН (ИК НАНУ, г. Киев)ПОЛУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА
ИЗ ОПИСАНИЯ В ПРОСТРАНСТВЕ СОСТОЯНИЙ*Рассмотрен процесс преобразования лестничной и мостовой структур цифрового фильтра на основании их представления в пространстве состояний.*

Для улучшения характеристик цифровых фильтров (ЦФ) широко используется методика преобразования и анализа их в пространстве состояний (ПС) [1—5]. Описание в ПС позволяет с единых позиций рассматривать динамику системы. Цифровая система при этом описывается системой уравнений [1]

$$\begin{cases} x(n+1) = A \cdot x(n) + b \cdot u(n); \\ y(n) = c \cdot x(n) + d \cdot u(n), \end{cases} \quad (1)$$

где размеры матриц A , b , c и d равны соответственно $N \times N$, $N \times 1$, $1 \times N$, 1×1 , $x(n) = [x_1(n) \dots x_N(n)]^T$ представляет собой вектор состояний (N — порядок фильтра), $u(n)$ и $y(n)$ — соответственно входная и выходная последовательности. При этом передаточная функция (ПФ) системы определяется соотношением

$$H(z) = c(zI - A)^{-1}b + d.$$

Задав произвольной не сингулярной $N \times N$ -матрицей T , можно осуществить преобразование подобия, заменяя элементы множества $\{A, b, c\}$ следующим образом:

$$A_1 = T^{-1}AT; \quad b_1 = T^{-1}b; \quad c_1 = cT^{-1}.$$

Такое преобразование не приводит к изменению $H(z)$, поэтому, выбирая различные матрицы T , можно получить большое количество различных вариантов заданной ПФ. При этом такие характеристики системы как коэффициенты масштабирования во внутренних узлах, условия возникновения переполнения, шум округления могут изменяться от реализации к реализации.

В работе [6] описана методика поиска наилучшей структуры ЦФ по критерию минимума уровня выходного шума округления из числа наиболее используемых структур. Для описания этого критерия использовалась методика в ПС [1—5], по которой необходимо определить параметры описания ЦФ в ПС в соответствии с системой уравнений (1), т. е. элементов матриц A , b , c и d на основе исходной структуры ЦФ.

Автоматический переход от исходной структуры ЦФ к структуре, описанной в ПС, и определение эле-

ментов новых матриц системы был рассмотрен в работе [7]. Применение этого алгоритма и программы позволило сократить время подготовки и решения задачи улучшения качественных показателей проектируемых схем ЦФ при любой их сложности и размерности. При переходе от улучшенной в ПС структуры ЦФ к улучшенной структуре ЦФ возникает ряд проблем.

На основании разработанного в [8] общего алгоритма внесения изменений необходимо:

— в исходную структуру ЦФ внести дополнительные связи, соответствующие новым ненулевым коэффициентам матриц описания в ПС;

— изменить значения коэффициентов передач (в том числе и единичных), чтобы преобразованная и исходная структуры ЦФ удовлетворяли одной и той же ПФ.

Изменение коэффициентов передач и ввод дополнительных связей основан на сопоставлении и анализе исходной структуры ЦФ и преобразованной структуры в ПС, причем для определения значений передач необходимо решить систему нелинейных алгебраических уравнений. На этапе решения системы уравнений возникают двузначности и неопределенности, не позволяющие найти ее решение. Введение же дополнительных элементов структуры и изменение параметров коэффициентов, согласно общему алгоритму внесения изменений, позволяет устранить двузначности в системе уравнений [8].

Осуществим преобразования на примере лестничной структуры (рис. 1).

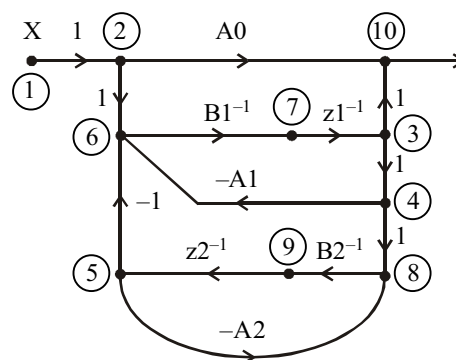


Рис. 1. Граф лестничной структуры ЦФ:
 X — входная последовательность ЦФ; $z1^{-1}$, $z2^{-1}$ — первый и второй элементы задержки

Для данной структуры расчет коэффициентов передач осуществляется в соответствии со следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} a_0 = A_0; \\ a_1 = \frac{A_0 \cdot A_2 \cdot B_1 + B_2 + A_0 \cdot A_1 \cdot B_2}{B_2 \cdot B_1}; \\ a_2 = \frac{A_2 + A_0 + A_0 \cdot A_1 \cdot A_2}{B_2 \cdot B_1}; \\ b_1 = \frac{A_2 \cdot B_1 + A_1 \cdot B_2}{B_2 \cdot B_1}; \\ b_2 = \frac{1 + A_1 \cdot A_2}{B_2 \cdot B_1}, \end{cases}$$

где a_0, a_1, a_2, b_1, b_2 — коэффициенты числителя и знаменателя ПФ второго порядка при степенях z^{-1} , соответствующих индексу коэффициента;
 z^{-1} — элемент задержки на один такт;
 A_0, A_1, A_2, B_1, B_2 — коэффициенты передач ветвей структуры ЦФ.

Система уравнений для построения структуры в ПС имеет вид

$$\begin{cases} a_{11} = -A_1 \cdot B_1^{-1}; \\ a_{12} = -B_1^{-1}; \\ a_{22} = -A_2 \cdot B_2^{-1}; \\ a_{21} = B_2^{-1}; \\ b_{11} = B_1^{-1}; \\ b_{21} = 0; \\ c_{11} = 1; \\ c_{12} = 0; \\ d = A_0, \end{cases}$$

где a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} и d соответствуют элементам матриц описания в ПС A, b, c и d , а индексы при них определяют их местоположение.

Для передаточной функции

$$H(z) = \frac{0,0745 + 0,12341 z^{-1} + 0,0745 z^{-2}}{1 - 1,1409 z^{-1} + 0,41323 z^{-2}}$$

(частота дискретизации 10 кГц) значения матриц в ПС соответственно равны

$$A = \begin{bmatrix} 1,3507 & -0,2084 \\ 3,3422 & -0,2098 \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} 0,2084 \\ 0 \end{bmatrix}; c = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

После применения матрицы преобразования вида

$$T = \begin{bmatrix} -0,3768 & -0,1198 \\ -1,5091 & 0,4797 \end{bmatrix}$$

получим матрицы, которые имеют вид

$$A_m = \begin{bmatrix} 0,5705 & 0,5133 \\ -0,1711 & 0,5705 \end{bmatrix};$$

$$B_m = \begin{bmatrix} -0,2765 \\ -0,8700 \end{bmatrix};$$

$$C_m = \begin{bmatrix} -0,3768 & -0,1198 \end{bmatrix}.$$

Проанализировав полученные матрицы, можно заметить, что структура изменится, т. к. появились новые ветви: C_1 — со входа структуры на вход элемента задержки z_2 (коэффициент b_{21} не равен нулю), C_2 — с выхода элемента задержки z_2 на выход ЦФ (c_{12} не равен нулю) и не единичный коэффициент K (коэффициент c_{11} не равен 1). Для того чтобы система уравнений имела решение, добавлен коэффициент V , при этом новая преобразованная лестничная структура показана на рис. 2.

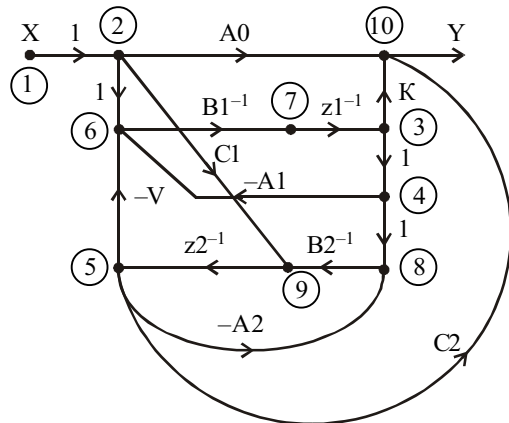


Рис. 2. Граф преобразованной лестничной структуры ЦФ: C_1, C_2, K, V — коэффициенты передач ветвей структуры; X, Y — соответственно входная и выходная последовательности ЦФ

Система нелинейных алгебраических уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{cases} A_m(1,1) = -A_1 \cdot B_1^{-1}; \\ A_m(1,2) = -V/B_1; \\ A_m(2,2) = -A_2/B_2; \\ A_m(2,1) = 1/B_2; \\ B_m(1,1) = 1/B_1; \\ B_m(2,1) = C_1; \\ C_m(1,1) = K; \\ C_m(1,2) = C_2; \\ d = A_0, \end{cases}$$

где $A_m(i,j), B_m(i,j), C_m(i,j)$ — элементы преобразованных матриц в ПС.

Преобразование структуры ЦФ было рассмотрено также на примере более сложной структуры мостового типа. В результате преобразований были полу-

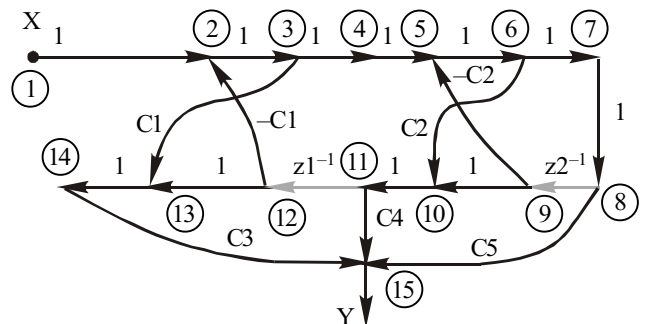


Рис. 3. Граф мостовой структуры ЦФ: C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 — коэффициенты передач ветвей мостовой структуры ЦФ

Значения дисперсии выходного шума округления структур ЦФ

Исходная структура	Структура, полученная в ПС	Структура, преобразованная в ПС	Преобразованная структура	Изменение дисперсии шума
Лестничная структура				
1000,011	14,664	4,126	458,040	Уменьшение в 2,207 раза
Мостовая структура				
446,950	4,493	4,126	771,969	Увеличение в 1,727 раза
			929,192	То же в 2,079 раза
			327720,0	То же в 733 раза

ченны три варианта структур и соответствующих им систем уравнений. Лучшая структура мостового типа по критерию минимума уровня выходного шума округления представлена на **рис. 3**. Рассмотрим изменения уровня выходного шума округления при этих преобразованиях.

Спектральная плотность мощности выходного шума округления определялась по формуле [9, с. 351]

$$S(\omega) = \frac{Q^2}{12} \sum k_j |T_{in}|^2, \quad (2)$$

где Q — величина шага квантования;

k_j — число источников шума;

T_{in} — ПФ от i -го источника шума к выходу.

Однако удобно пользоваться нормированной спектральной плотностью шума, полученной из (2):

$$\bar{S}(\omega) = \frac{S(\omega)}{\left(\frac{Q^2}{12}\right)} = \sum k_j |T_{in}|^2.$$

Величина выходного шума оценивалась по величине его дисперсии

$$\sigma_0^2 = \|\bar{S}(\omega)\|_1.$$

Значение дисперсии выходного шума округления структур при проведенных преобразованиях показаны в **таблице**.

Увеличение выходного шума у мостовых структур связано с тем, что появились дополнительные места ввода источников шума. При сопоставлении значений дисперсии выходного шума лестничной и мостовой структур ЦФ в ПС видно, что величина дисперсии у мостовой структуры ЦФ меньше, чем у преобразованной лестничной структуры ЦФ. Это означает, что применение преобразования структуры на основе метода пространства состояний позволяет улучшить только некоторые структурные реализации, соответствующие заданной передаточной функции. При этом преобразованная структура не является самой лучшей среди структур, удовлетворяющих заданной передаточной функции. Параметры выходного шума для одной и той же структуры, но для разных передаточных функций, могут быть как ухудшены, так и улучшены, причем оценить параметры можно после преобразований с помощью моделирования исходной и преобразованной структур ЦФ.

В результате проведенных исследований, а также с учетом [6, 7], можно сделать следующие выводы.

При выборе структур цифрового фильтра следует по заданной передаточной функции выбрать лучшую

структуру из числа известных на основании требуемых критериев качества.

Использование методов улучшения характеристик структур в ПС приводит к тому, что во многих случаях приходится отказываться от исходной структуры ЦФ, т. к. преобразованная в ПС структура является единственно лучшей. К этой единственной структуре будут сводиться все структуры при применении методов [1—5]. На практике это не всегда удобно, т. к. необходимо улучшать характеристики уже существующей структуры ЦФ. Следует также отметить, что преобразованной структуре ЦФ в ПС соответствует большое количество структур. Проблема возникает в выборе наилучшей структуры при заданных критериях качества и ограничениях на коэффициенты и структуру.

Другим путем решения задачи улучшения характеристик структуры ЦФ при заданных ограничениях и допущениях является путь поиска новых методов описания и преобразования, позволяющих однозначно получать лучшие структуры.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Mullis C. T., Roberts R.A. Synthesis of minimum roundoff noise fixed-point digital filters // IEEE Trans. on Circuits and Syst.— 1976.— Vol. CAS-23, Sept.— P. 551—561.
2. Jackson L. B., Lingren A. G., Kim Y. Optimal synthesis of second-order state-space structures for digital filters // Ibid.— 1979.— Vol. CAS-26, Mar.— P. 149—153.
3. Barnes C. W. Computationally efficient second-order digital filter section with low roundoff noise gain // Ibid.— 1984.— Vol. CAS-31, Oct.— P. 841—847.
4. Bomar B.W. On the design of second-order state-space digital filters sections // Ibid.— 1989.— Vol. CAS-36, April.— P. 542—552.
5. Rao B.V.D. Floating point arithmetic and digital filters // IEEE Trans. Signal Processing.— 1992.— Vol. 40, Jan.— P. 85—95.
6. Малахов В. П., Ситников В. С., Ступень П. В., Ульяшин С. В. Выбор структуры цифрового фильтра по уровню выходного шума округления // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2001.— № 2.— С. 17—22.
7. Ситников В. С., Ступень П. В., Куцак И. Л. Автоматизация структурных преобразований схемы цифрового фильтра // Там же.— 2002.— № 1.— С. 28—31.
8. Ситников В. С., Ступень П. В., Надоленко В. В. Применение метода пространства состояний к преобразованию структур цифровых фильтров // Тр. Одес. политехнич. ун-та.— 2000.— Вып. 2.— С. 138—141.
9. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов.— М.: Мир, 1978.

К. т. н. В. Ф. ПРИМИСКИЙ

Украина, г. Киев, НИИ "Украналит"
E-mail: ukr@analit.relc.com

Дата поступления в редакцию
19.06 2002 г.
Оппонент д. т. н. В. А. РУМБЕШТА
(г. Киев, НТУУ "КПИ")

ЭКОИНФОРМАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Описаны структура, особенности работы и технические характеристики газоаналитического комплекса "Пост экологического контроля автомобилей".

Постоянное загрязнение окружающей среды отработавшими газами автомобилей является одной из наиболее актуальных экологических проблем. В Германии на 80 миллионов жителей зарегистрировано свыше 40 млн. автомобилей. На Украине эта цифра достигает 6—7 млн. и ежегодно увеличивается на 200—250 тысяч. Всего же по дорогам мира колесит около 600 млн. автомобилей, а постоянное увеличение количества автомобилей приводит к прогрессирующим техногенным нагрузкам на окружающую среду. По оценке исследователей различных стран, именно выхлопные газы автомобилей дают до 70—80% отдельных загрязнителей, есть данные [1, с. 28], что 95% концентрации СО в воздухе Нью-Йорка связано с выделениями автотранспортных средств.

В табл. 1 приведены данные о количестве токсичных компонентов, образующихся при сгорании 1 кг топлива для усредненного легкового автомобиля класса "Жигули", "Опель", "Фиат" в зависимости от типа двигателя — бензинового или дизельного.

Эффективно оценить экологическое состояние автомобиля можно только при условии объективного контроля состава отработавших газов инструментальными способами: газоанализаторами (ГА) и газоаналитическими комплексами, дымомерами (опасиметрами) и др.

Таблица 1

Количество токсичных компонентов, выделяемых при сгорании 1 кг топлива, г

Компонент	Вид топлива	
	Бензин	Дизельное топливо
Оксид углерода (СО)	465,00 (378)	20,00
Оксиды азота (NO)	15,80 (21,2)	18,10
Углеводороды (CH)	23,20 (14,5)	4,10
Альдегиды	0,93	0,78
Ангидрид серной кислоты	1,86	7,80
Сажа, г/м ³	1,00	5
Свинец	0,5	—
Всего:	508,99	51,56

Международное сообщество, учитывая серьезность проблемы, разработало ряд международных стандартов — Правил Европейской экономической комиссии (ЕЭК) ООН по транспорту, регламентирующих нормы выбросов различных типов автомобилей, методы газового анализа, процедуру измерений, требования к техническим параметрам газоанализаторов, к метрологии.

С учетом требований Правил 49 и 83 ЕЭК ООН, а также выработанных на их основе нормативов Евро-II, -III, -IV, в АО "Украналит" впервые в СНГ разработан газоаналитический комплекс — пост экологического контроля автомобилей (ПЭКА) (рис. 1), соответствующий международным стандартам. Пост предназначен для одновременного параллельного измерения концентрации СО, С_nH_m, NO_x (NO, NO₂), есть возможность доукомплектации поста измерительными каналами СО₂, O₂ и определения расчетной величины λ (соотношение "воздух/топливо").



Рис. 1

ПЭКА построен на основе трех уровней иерархического функционирования [2].

Первый уровень. Выполнение измерений с помощью каждого из газоанализаторов 344ХЛ14 (NO_x), 334КПИ1 (С_nH_m), 121ФА14 (СО) автономно и независимо друг от друга. Все газоанализаторы имеют свои системы питания, фильтрации газовой пробы, цифровую индикацию результатов измерений. Каждый газоанализатор используется для измерения концентрации только "своего" газа.

Второй уровень. Все газоанализаторы komponуются в передвижную стойку и работают через общий блок подготовки пробы. Результаты измерений фиксируются на индикаторе каждого газоанализатора, а также передаются на принтер и распечатываются.

Третий уровень — более полный функциональный вариант второго уровня за счет применения ПЭВМ. При этом печатается не только протокол результатов измерений нескольких видов, но и выбирается алгоритм управления ПЭКА (выбор диапазонов и режимов работы, калибровка, самодиагностика и

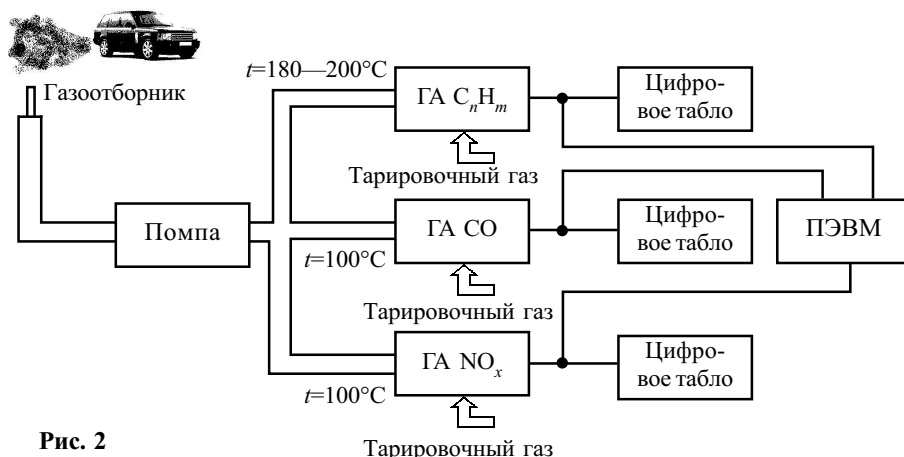


Рис. 2

т. д.), проводится архивация накопленной информации, определение погрешности измерений, формирование графического и табличного представления информации, определение максимальных и минимальных значений по каждому каналу измерений и т. п.

На рис. 2 представлена общая функциональная схема ПЭКА третьего уровня. В соответствии с требованиями Евро-II, -III, -IV и Правилами 49.83 ЕЭК ООН газоанализаторы комплекса реализуют для измерений концентрации компонентов инфракрасный абсорбционный метод (CO), пламенно-ионизационный (C_nH_m), хемилюминесцентный (NO_x).

Основные технические характеристики ПЭКА приведены в табл. 2.

Инфракрасный метод (NDIR-метод) основан на измерении величины ослабления интенсивности потока ИК-излучения или поглощения его газовым компонентом при прохождении этого потока через анализируемую газовую смесь. Метод инфракрасной спектроскопии является наиболее распространенным и селективным для определения концентрации окиси углерода (CO), углеводородов (CH), двуокиси углерода (CO_2) в составе сложных многокомпонентных газовых смесей. Основным диапазоном анализа является инфракрасная область спектра с длиной волны до 15 мкм. Для выделения узких участков спек-

ра, которые характерны для CO , CO_2 , CH , применяют интерференционные оптические фильтры с минимальным коэффициентом поглощения, а также надежные источники ИК-излучения и приемники излучения с высокой чувствительностью.

Структурная схема разработанного газоанализатора приведена на рис. 3 [3]. Основой его является высокочувствительная схема первичного оптического преобразователя. Конструкция кюветы,

имеющей два канала (рабочий и сравнительный) при использовании общей межканальной перегородки, обеспечивает наиболее высокую корреляционную связь между сравнительным и опорным сигналами. Используется один, общий для двух камер, источник ИК-излучения. Все эти конструктивные и технологические решения существенно снижают влияние внешних дестабилизирующих факторов (старение источника излучения, температура окружающей среды, давление, влажность). Особо следует отметить применение специализированного концентратора потока излучений, повышающего селективность и чувствительность измерений. Наличие полос поглощения различной интенсивности позволяет выбрать оптимальные условия измерения и создать прибор с высокими селективными возможностями.

Пламенно-ионизационный метод (FID-метод) используется для измерения концентрации суммы углеводородов CH . Суть метода заключается в том, что газ, подлежащий анализу, направляется в водородное пламя. При температуре $2000^\circ C$ происходит диссоциация молекул углеводородов на CH -группы, их окисление с освобождением электронов и положительных ионов CHO^+ . Если в зону водородного горения приложить электрическое поле, возникает ионизационный ток, пропорциональный количеству CH -групп в молекуле углеводородов.

Таблица 2

Тип газоанализатора, газ	Метод газового анализа	Инструментальная погрешность измерения, %	Диапазон измерений	Вес, кг	Габариты, мм
121ФА14, оксид углерода (CO)	Инфракрасный абсорбционный (NDIR)	± 3	0—0,5% 0—1% 0—5% 0—1%	12	450×400×200
344ХЛ14, оксид азота (NO_x)	Хемилюминесцентный (GLD)	± 3	0—100 млн ⁻¹ 0—500 млн ⁻¹ 0—2000 млн ⁻¹ 0—5000 млн ⁻¹ для NO_2 0—200 млн ⁻¹	12	450×400×200
334КПИ14, углеводороды (C_nH_m)	Пламенно-ионизационный (FID)	± 3	0—200 млн ⁻¹ 0—500 млн ⁻¹ 0—1000 млн ⁻¹ 0—5000 млн ⁻¹	12	450×400×200
Интерфейс			RS 232		

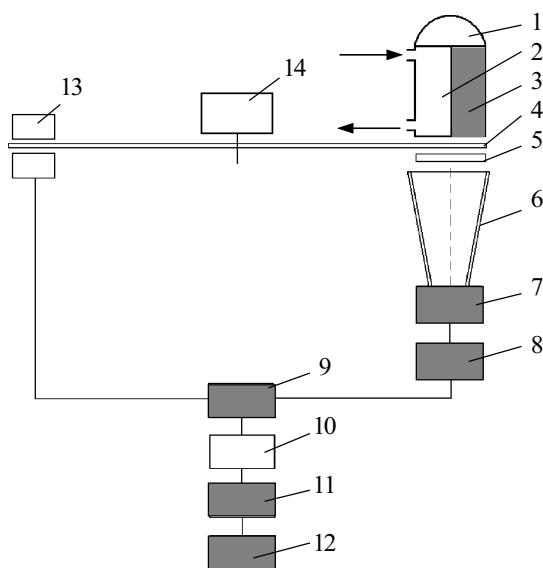
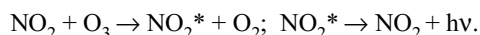


Рис. 3.

1 — источник ИК-излучения; 2 — рабочая камера (кювета); 3 — сравнительная камера; 4 — обтюратор; 5 — интерференционный фильтр; 6 — концентратор ИК-излучения; 7 — приемник излучения; 8 — усилитель; 9 — блок обработки измерительной информации; 10 — функциональный преобразователь (линеаризатор); 11 — аналого-цифровой преобразователь; 12 — цифровой индикатор; 13 — датчик положения обтюратора; 14 — электродвигатель

Пламенно-ионизационный преобразователь принят как стандартный для измерений суммарного количества углеводородов. К недостаткам метода можно отнести относительную сложность конструкции сенсора и необходимость создания трех газовых потоков (анализируемого газа, водорода и воздуха для горения), а также изменение выходного сигнала сенсора при колебаниях содержания кислорода в анализируемом газе [3, 4].

Хемилюминесцентный метод (GLD-метод) газового анализа используется для измерения концентраций NO. Принцип хемилюминесценции заключается в том, что вследствие реакции оксида азота (NO) с озоном (O₃) образуется диоксид азота (NO₂) с определенной частью молекул (NO₂^{*}) в возбужденном состоянии, которые довольно быстро излучают инфракрасный квант, возвращаясь в нормальное положение:



Данные исследований показали, что в процессе образования диоксида азота с помощью озона только около 10% молекул диоксида азота находятся в возбужденном состоянии — NO₂^{*}. При возвращении

возбужденных молекул NO₂^{*} в нормальное состояние (NO₂) излучаются кванты hν с длиной волны 590—2500 нм в близкой инфракрасной области с максимальной интенсивностью около 1200 нм. Интенсивность излучения, пропорциональная концентрации NO, воспринимается инфракрасным сенсором [5, 6].

Инструментальная погрешность измерений ±3% по каждому из газоанализаторов.

Отличительной особенностью ПЭКА является наличие микропроцессорной системы контроля и самодиагностики. Система обеспечивает ежедневный контроль герметичности прибора, введение автоматической поправки на атмосферное давление, информацию о времени, оставшемся до очередной метрологической аттестации, диагностику работоспособности основных электронных узлов прибора.

Разработанный ПЭКА прошел государственные испытания и успешно эксплуатируется в головном научном центре Минтранса Украины — ГосавтотрансНИИпроекте при проведении сертификационных исследований отечественных и зарубежных автомобилей на соответствие экологическим требованиям Евро-II, -III, -IV, а также при проведении научно-исследовательских и конструкторских работ на предприятиях Украины в сфере авто- и моторостроения (гг. Львов, Мелитополь, Харьков, Запорожье). С помощью ПЭКА возможно осуществление экологического контроля автомобилей украинских автоперевозчиков при поездках в Западную Европу.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Абрацумян В. В., Носов В. Б., Тагасов В. Г. Экологическая безопасность автомобильного транспорта. — М.: Научтехлитиздат, 1999.
2. Румбешта В. А., Примиский В. Ф. Технические схемы и метрологическое обеспечение измерения эмиссий // Тез. докл. семинара "Стан та перспективи розвитку метрологічного забезпечення вимірювань складу та властивостей речовин". — Київ, 1999.
3. А. с. № 1549315 СССР. Оптический абсорбционный газоанализатор // В. В. Богданов, В. П. Морозов, В. Ф. Примиский. — Оpubл. в Б. И. — 1988, № 4.
4. Пат. 2140648 России. Пламенно-ионизационный газоанализатор // В. Ф. Примиский. — Оpubл. в Бюл. — 2000, № 6.
5. Пат. № 9825 України. Хемілюмінесцентний газоаналізатор оксидів азоту // В. П. Приміський. — Оpubл. в Бюл. — 1996, № 3.
6. А. с. 1784883 СССР. Хемилюминесцентный газоанализатор окислов азота / В. Ф. Примиский, В. Г. Михальчевский, Л. А. Цуканова. — Оpubл. в Б. И. — 1992, № 8.

К. т. н. М. Д. СКУБИЛИН, к. т. н. О. Б. СПИРИДОНОВ

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

Дата поступления в редакцию
23.01 2002 г.

Оппоненты
к. т. н. Г. А. ШТЕЙНИКОВ (ТИУЭ, г. Таганрог),
С. А. АДАРЧИН ("Автоэлектроника", г. Калуга)

СИСТЕМА ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ ТОКСИЧНОСТИ ВЫХЛОПА ДВИГАТЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Предложена система диагностики двигателей транспортных средств в реальном масштабе времени с учетом погодных условий.

Как известно (например [1, 2]), основными источниками загрязнения воздуха являются крупные предприятия металлургии, химического производства, тепловые электростанции, автотранспортные средства. Особо опасно загрязнение воздуха, приводящее к образованию смога — смеси дыма и газовых отходов предприятий и транспортных средств. Возникновению смога способствуют и определенные условия погоды.

Для кардинального улучшения экологичности транспортных средств с двигателями на жидком и газообразном топливе, и автомобилей, в частности, необходимо существенное повышение качества топлива, улучшение технических характеристик двигателей и сокращение форсированных режимов их работы. Улучшению их экологического состояния способствует техническая диагностика транспортных средств, но она не может кардинально изменить ситуацию. Существующие методики и средства диагностики, как правило, не исключают субъективизма, предполагают ее периодичность (в лучшем случае 1—2 раза в год) и не учитывают реальных, постоянно меняющихся во времени и пространстве, условий эксплуатации.

Технические параметры российских автомобилей в лучшем случае соответствуют требованиям "ЕВРО-1". Поэтому новый российский автомобиль практически любой марки, пригнанный из магазина на техническую диагностику, не может ее пройти в принципе. Что же касается автомобилей в возрасте от года и старше, то в подавляющем большинстве они, в т. ч. и импортные, в экологическом смысле потенциально и реально опасны [3].

Для непрерывного контроля токсичности продуктов выхлопа двигателей транспортных средств в реальном масштабе времени с целью снижения степени загрязнения воздуха представляется приемлемой следующая система.

На въездах на территории с ограничениями допустимого значения токсичности выхлопа устанавливаются передающие устройства (см. рис. 1), в составе которых генератор импульсов (ГИ), датчик состояния погоды (ДП) на впереди расположенном участ-

ке пространства, преобразователь "аналог—код" (ПАК), делитель частоты (ДЧ), триггер (Тр), модулятор (М) и передатчик (П).

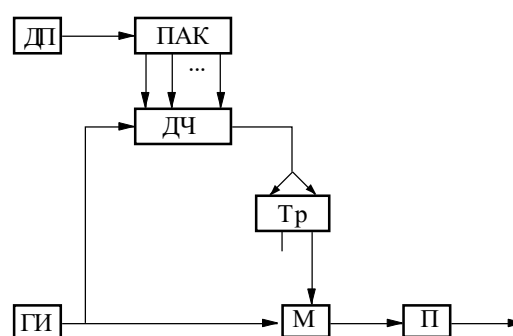


Рис. 1. Функциональная схема передающей (стационарной) части системы контроля токсичности выхлопа двигателей транспортных средств

Приемная часть системы (см. рис. 2) устанавливается на транспортном средстве. В нее входят приемник (Пр), демодулятор (ДМ), триггер (Тр), формирователь переднего фронта импульса (ФИ), элемент задержки (ЭЗ), регистр сдвига (РС), два устройства сравнения (УС), датчик контролируемого параметра (ДКП), задатчик предельно допустимого значения контролируемого параметра (ЗПДЗКП), два элемента И (И), элемент ИЛИ (ИЛИ) и индикатор предупредительной сигнализации (ИПС).

Датчик ДП передающего устройства генерирует информацию о направлении и скорости ветра, темпе-

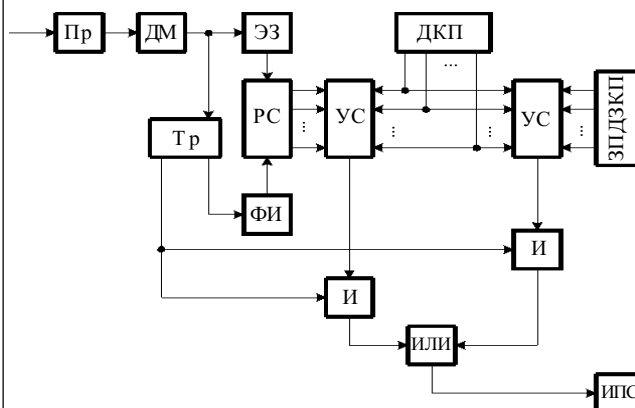


Рис. 2. Функциональная схема приемной стороны системы контроля, установленной на транспортном средстве

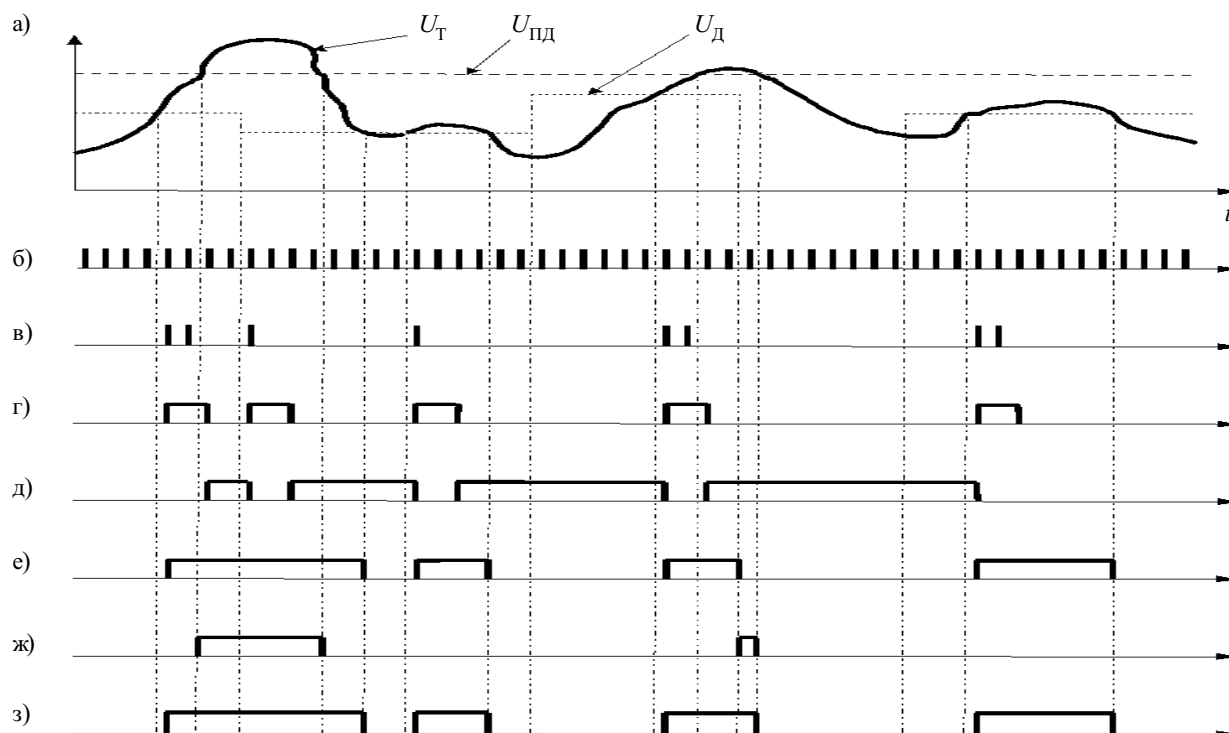


Рис. 3. Диаграммы потенциалов на выходах узлов:
а — ЗПДЗКП ($U_{ПД}$), ДКП ($U_Д$ и U_T); б — ГИ; в — ДМ; г и д — Тр; е и ж — УС; з — ИЛИ

ратуре и влажности воздуха, его прозрачности и содержании в нем CO , а установленный на транспортном средстве датчик ДКП — информацию о содержании CO в выхлопе.

На рис. 3 показаны диаграммы потенциалов на выходах функциональных узлов системы. Предлагаемая система за счет непрерывного контроля токсичности выхлопа двигателя в реальном масштабе времени обеспечивает реальной информацией водителя, а также других лиц, включая персонал ГИБДД.

Рассмотренная система текущего контроля токсичности выхлопа двигателей транспортных средств может представить интерес для служб, ведущих мониторинг состояния окружающей среды. Ее внедрение

позволит уменьшить вероятность форсированных режимов эксплуатации двигателей, а следовательно, стимулировать уменьшение загрязнения воздуха.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Щербань А. Н., Примаков А. В., Копейкин В. И. Автоматизированные системы контроля загрязненности воздуха. — К.: Техніка, 1978.
2. Подольский В. П., Артюхов В. Г., Турбин В. С. Автотранспортное загрязнение придорожных территорий. — Воронеж: ВГУ, 1999.
3. Касьяненко А. А., Работяжев В. В., Кожин В. И., Михайличенко К. Ю. О приоритетах в решении экологических проблем автотранспортного комплекса // Вестник РУДН. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. — М.: 2000. — № 4. — С. 169—176.

12—15 ноября

Омск 2002

СИБИРСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ФОРУМ

ОМСКПОЛИТЕХ

Станки

Металлообработка

Радиотехника

Нефтехимия

Полиграфия

Автоматизированные системы управления

Экология

Сварка

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ. СИМПОЗИУМЫ

Организатор: МВЦ "Интерсиб"
644033, Россия, г. Омск,
ул. Красный путь, 155, корп. 1.
Тел. (3812) 25-25-56.
Тел./факс (3812) 25-72-02.
E-mail: fair@intersib.omsk.ru
http://www.intersib.omsk.ru

СИБИРСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ФОРУМ

ОМСКПОЛИТЕХ

12—15 ноября

Омск 2002

Д. т. н. И. Ш. НЕВЛЮДОВ, к. т. н. В. А. ПАЛАГИН,
В. А. МАКАРЕНКО

Украина, Харьковский национальный университет
радиоэлектроники
E-mail: zygin@kture.kharkov.ua

Дата поступления в редакцию
08.01 2002 г.

Оппоненты
д. т. н. Б. А. ЯКИМОВИЧ (ИГТУ, г. Ижевск),
д. т. н. Ю. А. ДОЛГОВ
(ПТУ им. Т. Г. Шевченко, г. Тирасполь)

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

На примере процесса термообработки толстопленочных микросборок показано применение теории решений Байеса для проектирования технологии.

Цель поиска решения в задачах автоматизированного проектирования технологических процессов состоит в получении такого варианта его реализации, который был бы определен с достаточными для практического применения условиями и был бы по определенному критерию лучшим из рассматриваемых.

Сравнение возможных вариантов технологического процесса может выполняться различными математическими методами: с использованием марковских процессов с доходами [1], байесовских статистических решений [2], теории систем массового обслуживания [3], операторными методами [4] и многими другими [5], учитывающими те или иные характеристики разрабатываемых технологических процессов.

В настоящей работе предложен метод выбора лучшего варианта по критерию минимальной стоимости для процесса вжигания пленочных элементов (слоев) толстопленочных микросборок с использованием байесовских решений.

В теоретико-множественном представлении процесс отыскания лучшего решения заключается в нахождении на множестве всех возможных решений A пересечения рассматриваемого разработчиком подмножества решений Y и подмножества Θ , характеризующегося минимальными стоимостями технологического процесса (ТП).

Модель процесса основана на байесовой теории решений и позволяет охарактеризовать область пересечений $Y \cap \Theta$ путем "выворачивания" деревьев решений [6, с. 39] по априорным экспертным оценкам дискретных распределений стоимостей разработки. Уточнение этих распределений при получении конкретных стоимостей экспериментальных данных на определенных этапах разработки производится по формуле Байеса.

Последовательность этапов работ, в результате выполнения которых получается наилучшее решение на момент оценки всей имеющейся информации, выглядит следующим образом:

- составление априорных оценок подмножества Y ;
- преобразование априорных оценок в свойства вычислительной сети;
- построение дерева решений;
- расчет ожидаемой выгоды для всех операций дерева;
- уточнение априорных оценок и усечение неперспективных;
- наилучший вариант.

Процесс поиска такого решения осуществляется в виде последовательности расчетных и (или) физических "экспериментов", т. е. действий, в которых приобретает информация о природе возможных решений.

Для иллюстрации работы разработанной модели рассмотрим представленную в виде дерева решений (рис. 1) задачу выбора лучшего варианта ТП вжигания толстопленочных микросборок по критерию затрат для разных методов вжигания, описанных в работах [7—9], и разных установок вжигания.

Исходные данные для расчетов представляются в виде экспертных оценок распределений вероятностей получения дискретных значений стоимости реализации ТП — $p(y)$ (рис. 2, а). Также в предположении наблюдения каждого из дискретных значений y_i

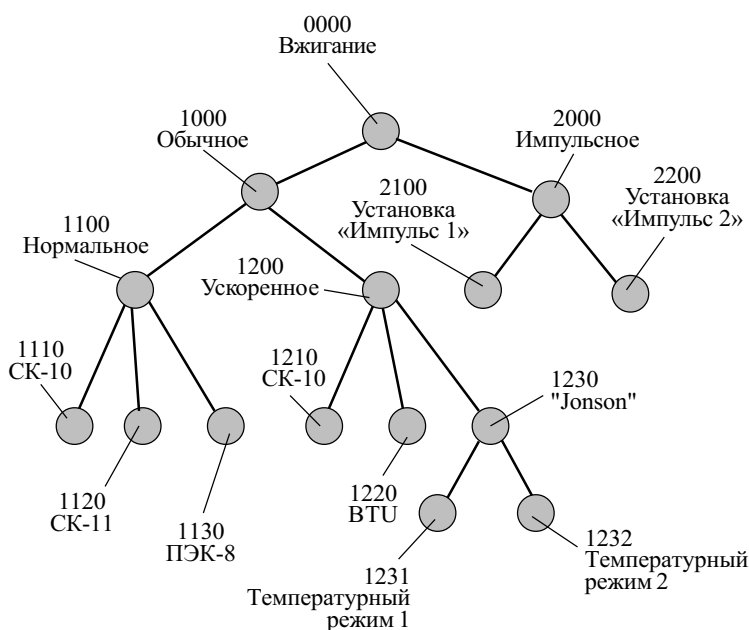


Рис. 1. Пример построения дерева решений

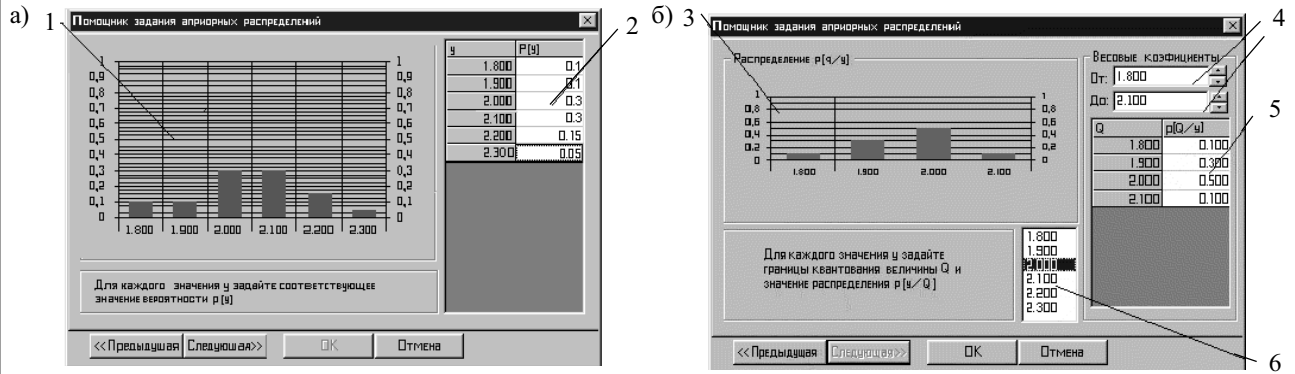


Рис. 2. Окна "помощника" задания априорных распределений

а) окно задания распределения $p(y)$: 1 — гистограмма распределения $p(y)$; 2 — таблица ввода дискретных значений $p(y)$; б) окно задания априорного распределения $p(\theta/y)$: 3 — гистограмма распределения $p(\theta/y)$; 4 — поля ввода границ диапазона условного распределения $p(\theta/y)$; 5 — таблица ввода дискретных значений $p(\theta/y)$; 6 — поле выбора значений y , для которых задается распределение $p(\theta/y)$

проектировщику необходимо задать распределение условных вероятностей получения минимальных стоимостей $p(\theta/y_j)$ (рис. 2, б). Эти оценки относятся ко всему рассматриваемому подмножеству вариантов ТП — Y , которому на дереве решений соответствует вершина с индексом 0000.

Вершины дерева представляют собой, согласно терминологии [2], операции, а ребра — операторы. Операция — решение либо множество решений в n -мерном пространстве решений. Оператор — множество процедур, применяемых к какой-либо операции, чтобы произвести другую операцию, более низкого уровня, со стоимостью y и вероятностью ее наблюдения $P_{ij}(y)$.

Вершина дерева 0000 представляет "универсальную" операцию, т. е. множество всех возможных решений, включая "нулевую" операцию, представляющую собой отсутствие решения. Операции могут быть разделены на "неосновные", т. е. операции, определяющие перспективную зону поиска решений, и "основные" — операции самого низкого уровня, представляющие конкретные решения в рамках этой зоны.

Преобразование исходных данных $p(y)$ и $p(\theta/y)$ в свойства вычислительной сети заключается в нахождении распределений $p(\theta)$ и $p(y/\theta)$ для универсальной операции — вершины $j=0000$. Данное преобразование выполняется с использованием свойства симметрии совместных вероятностей $p(y, \theta)$ в отношении элементов y и θ , которые справедливы для каждой операции j дерева.

$$p(y, \theta) = p(y)p(\theta/y) = p(\theta)p(y/\theta). \quad (1)$$

Распределение минимальных стоимостей $P_j(\theta)$ можно рассматривать как свойство операции j . Штрих в обозначении вероятности обозначает априорное распределение.

Если на операцию j воздействовать оператором уровня $i - e_{ij}(y/\theta)$ (произвести эксперимент e_{ij}), то получим распределение $P_{ij}(y)$ для операции k более низкого уровня иерархии ($k \in j$), т. е. свойства вершин определяются свойствами включающих операций и возможностями операторов, соединяющих их. Расчеты ведутся по формулам

$$P_{ij}(y) = \int p_i(y/\Theta) p_j(\Theta) d\Theta \quad (2)$$

$$p(\Theta) = \int P_{ij}(\Theta, y) dy; \quad (3)$$

$$p(y/\Theta) = P_{ij}(\Theta, y) / p(\Theta). \quad (4)$$

Прямое вычисление $p(y/\theta)$ по формуле (2) дает ненормированное значение условных вероятностей, характеризующих оператор, поэтому полученные априорные распределения должны пройти этап нормализации. Для нормирования введем вспомогательную переменную $m = y - \theta$, характеризующую величину смещения минимальных значений стоимости θ от наблюдаемого в эксперименте результата, и функцию

$$p(m) = \sum_{\Theta} p(\Theta, y = m + \Theta). \text{ Распределение } p(m) \text{ может}$$

быть принято за вероятность $p(y/\theta)$, и оно обеспечивает нормирование.

На следующем этапе проектировщик представляет картину возможных решений, стараясь наиболее широко и полно представить варианты возможных решений с подробной конкретизацией (см. рис. 1). Такая древовидная схема позволяет наглядно представить важные для разработчика аспекты "истории" решения задачи по выбору наилучшего ТП и определить:

- число операций, которые генерируются и просчитываются;
- последовательность, в которой эти операции выполняются;
- их относительные уровни, т. е. с помощью каких операторов они производятся;
- для каждой операции ее общую "генеалогия", т. е. в какие операции она включена и какие операции сама включает.

Если в эксперименте была получена конкретная стоимость y^* для какой-либо основной операции, происходит уточнение априорных оценок по формуле Байеса.

Для всех операций k , включающих данную операцию k^* , апостериорное значение —

$$p''(\Theta/y^*) = \frac{p'(\Theta) p_i(y^*/\Theta)}{\int p'(\Theta) p_i(y^*/\Theta) d\Theta}. \quad (5)$$

Для всех других операций распределения вероятностей остаются без изменений.

Таким образом, при получении конкретной стоимости априорные значения в распределении θ уточняются вверх по иерархии, не затрагивая остальных ветвей дерева решений.

Чтобы значительно уменьшить количество рассматриваемых вариантов, необходимо введение аппроксимаций, смысл которых состоит в "усечении" ветвей дерева решений, т. е. в определении точки, в которой можно прекратить рассмотрение дальнейшей последовательности процесса в связи с тем, что выполненная серия экспериментов уже дала достаточно информации, и оптимальным решением является прекращение дальнейшего анализа. Это позволяет исключить из дальнейшего рассмотрения целые "поддерева". Правила, используемые для этого, называются правилами "усечения".

Еще один вопрос связан с необходимостью определения некоторого эквивалентного значения для граничной точки, которое представляло бы величину ожидаемой выгоды от использования оптимальной стратегии на отсеченной части дерева.

После проведения необходимых уточнений распределений по результатам эксперимента проектировщик выберет среди всех ранее полученных операций ту, которая связана с наименьшими затратами — R . Выполнив ли еще один дополнительный эксперимент для наблюдения результата y^{**} , зависит от ожидаемой выгоды получения операции со стоимостью $y^{**} < R$. "Выгода" будет оценкой такой операции. Стоимость операции будет равна меньшему из чисел R и y^* . Стоимость результата определится из выражения

$$u(e_{ij}, y^{**}) = c + \min(R, y^{**}), \quad (6)$$

где c — стоимость эксперимента.

Для вычисления ожидаемых затрат в указанном эксперименте используем величину $P_{ij}(y)$; тогда

$$u^*(e_{ij}) = \int_0^{\infty} P_{ij}(y) u(e_{ij}, y) dy = c + \int_0^R y P_{ij}(y) dy + R \int_R^{\infty} P_{ij}(y) dy. \quad (7)$$

При окончании процесса в данной точке соответствующие затраты будут равны:

$$u^*(e_0) = R.$$

Проектировщику следует проводить эксперимент e_{ij} вместо окончания процесса только если

$$\int_0^R (R - y) P_{ij}(y) dy > c. \quad (8)$$

Таким образом, если ожидаемое сокращение затрат при выборе наилучшего из найденных вариантов основных операций будет меньше либо равно стоимости проведения нерассмотренного эксперимента e_{ij} , он будет исключен из рассмотрения.

В процессе исследования было разработано Windows-приложение, позволяющее проверить эффективность данной теории. Для реализации данного приложения был применен объектно-ориентированный подход к программированию с использованием MS Visual C++ [10]. Процесс выбора наилучшего варианта разработки с помощью данного программного продукта прост и может контролироваться технологом на каждом этапе поиска.

Рассмотрим работу данной программы на примере задачи выбора лучшего технологического процесса виггания толстопленочных микросборок.

После задания диапазона значений стоимости y и шага квантования, влияющего на точность априорной оценки, технолог непосредственно переходит в окно "помощника", предназначенное для задания вероятностных оценок каждой дискретной стоимости данного диапазона (см. рис. 2, а). При вводе значений $p(y)$ для каждого дискретного y_i в таблицу ввода 2 разработчик может визуальнo контролировать вид и изменения распределения в гистограмме 1.

На следующем этапе технологу необходимо перейти в окно задания условных распределений $p(\theta/y)$ (см. рис. 2, б). Перебирая по очереди все дискретные значения y в списке 4, необходимо задать для каждого элемента этого списка границы распределения $p(\theta/y)$ в полях ввода 2 и значения условных вероятностей в таблице ввода 5. Аналогично предыдущему шагу, вид каждого из заданных распределений можно контролировать при помощи гистограммы 1.

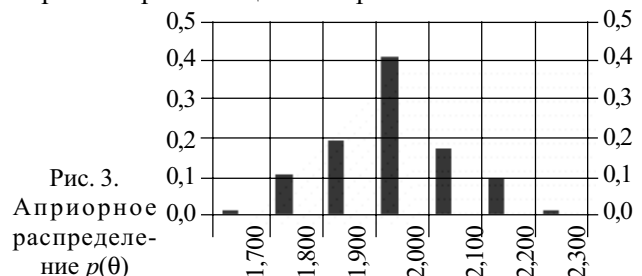


Рис. 3. Априорное распределение $p(\theta)$

После преобразования априорных распределений для универсальной операции в распределение $p(\theta)$ для этой операции и распределение $p(y/\theta)$ для оператора, свойства операций более низкого уровня в иерархии дерева решений формально порождаются (определяются) операциями более высокого уровня, и технолог должен развернуть дерево решений ТП, начиная с верхнего уровня (см. рис. 3). Разработанное программное приложение позволяет строить дерево решений с присвоением индексов для каждой операции (см. рис. 4). Так, распределение $p(\theta)$ универсаль-

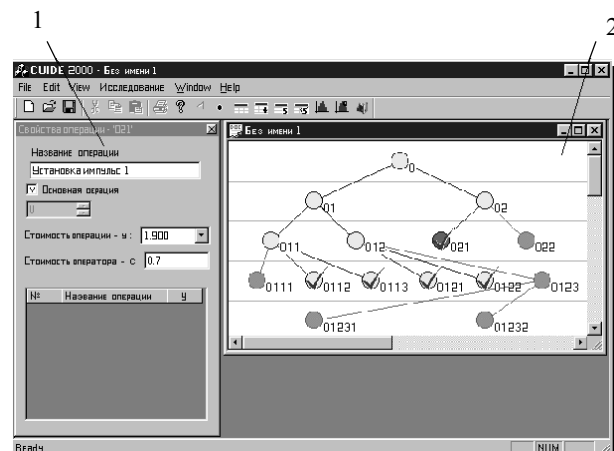


Рис. 4. Основные окна приложения:
1 — окно задания свойств операции; 2 — окно построения дерева решений
● — рассмотренная операция; ○ — наилучшая операция;
● — отсеченная операция

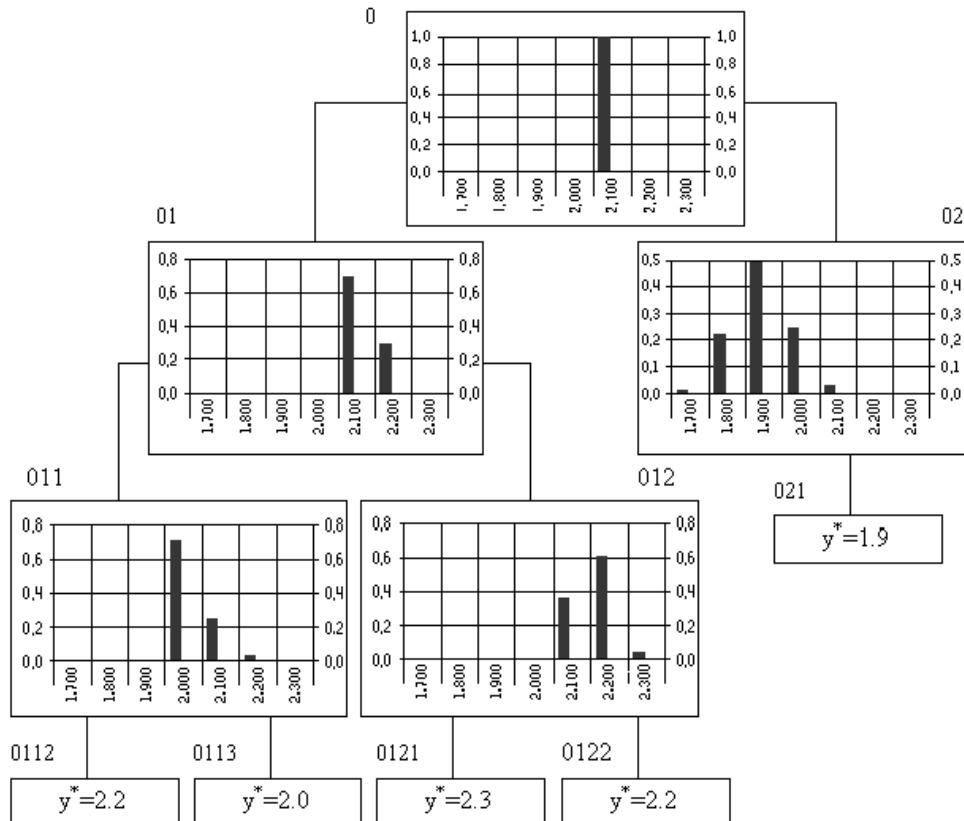


Рис. 5. Состояние распределений в узлах усеченного дерева решений

ной операции приписывается операциям j дерева до получения экспериментальных данных по какой-либо основной операции y^* (принцип транзитивности).

Основным методом вжигания слоев толсто пленочных микросборок, широко используемым промышленными предприятиями, является вжигание в многозонных конвейерных печах типа СК-10, СК-11, ПЭК-8, печей фирмы ВТУ и Jonson, обеспечивающих поддержание температуры в зоне максимального нагрева с точностью $1...2^\circ\text{C}$, ламинарный поток воздуха в муфеле печи, направленный встречно движению обжигаемых изделий, стабильную скорость движения конвейера, заданную скорость нагрева и охлаждения подложек. Длительность процесса вжигания каждого слоя многослойных коммутационных плат примерно равна $90...105$ минутам [7]. Известны также работы по ускоренному вжиганию слоев микросборок [8], сокращающему время вжигания в $2...4$ раза, а также по импульсному вжиганию за $90...20$ секунд, уменьшающему длительность вжигания в $10...100$ раз [9]. Исходя из возможных вариантов вжигания было построено дерево решений. Описание соответствий операций дерева решений и вариантов разработки приведено на рис. 1.

По мере получения конкретных стоимостей y^* в операциях 0112, 0113, 0121, 0122 и 021 априорные распределения минимальной стоимости θ были уточнены по формуле (5), а неперспективные варианты разработки дерева решений усечены. Состояние распределений в узлах усеченного дерева решений приведены на рис. 5, а изменение распределения $p(\theta)$ в универсальной операции — на графике рис. 6.

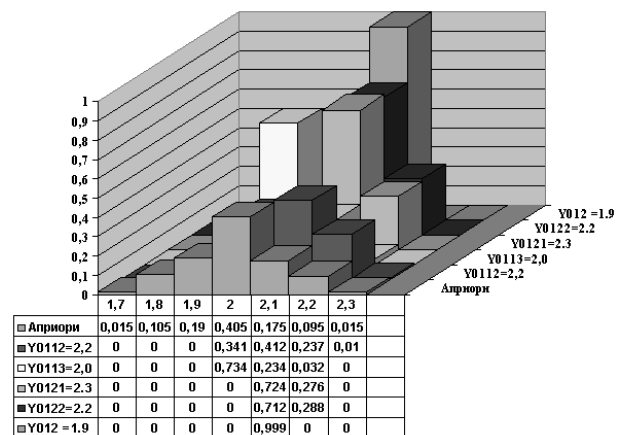


Рис. 6. График изменения распределения $p(\theta)$ в универсальной операции

Из полученных данных видно, что наилучшим вариантом разработки будет технологический процесс, определяющийся операцией 021, т. е. вжиганием импульсным методом на установке "Импульс 1", с наибольшей вероятностью получения минимальной стоимости $\theta=2,1$ тыс. грн.

Таким образом, предложенная методика позволяет выбрать лучший из рассматриваемых вариантов на каждом шаге разработки с использованием формализованной процедуры и может применяться для сравнения вариантов технических решений на разных стадиях проектирования в различных областях техники и жизнедеятельности.

Методика адаптивна, т. е. полученные в результате выполнения этапов работы экспериментальные данные используются для уточнения "априорных" распределений. "Эксперименты" могут быть расчетные или реальные физические. "Усечение" неперспективных по данному критерию направлений существенно сокращает объемы затрат на расчеты.

Программа расчетов, построенная при помощи современных средств разработки с применением передовых информационных Active X-технологий, может быть адаптирована к широкому кругу задач, т. к. является OLE-сервером, и может быть полезна в использовании не только технологами, но и разработчиками программного обеспечения. Программное приложение имеет широкие возможности по подключению и использованию клиент-серверных баз данных, что делает его удобным для использования большими рабочими группами проектировщиков и разработчиков.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Майн Х., Осаки С. Марковские процессы принятия решений. — М.: Наука, 1977.

2. Невлюдов И. Ш., Зубков В. М., Палагин В. А. Последовательный выбор лучшего варианта разработки // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. — 1999. — № 1. — С. 74—80.

3. Бушминский И. П., Даутов О. Ш., Достанко А. П. и др. Технология и автоматизация производства РЭА. — М.: Радио и связь, 1989.

4. Маслов В. П. Операторные методы. — М.: Наука, 1973.

5. Восков Л. С., Абрамов В. Н., Авдотин С. М. Пути ускоренного создания ГПС. — Кишинев: Картя Молдовеныска, 1987.

6. Райфа Г. Анализ решений. Введение в проблему выбора в условиях неопределенности. — М.: Мир, 1977.

7. ОСТ 92-4676—85 Микросборки толсто пленочные. Типовые технологические процессы изготовления плат. — М.: Радио и связь, 1987.

8. А. с. 1168079 СССР. Способ изготовления толсто пленочных печатных плат / В. А. Палагин, Н. Г. Мороз, П. Н. Богатов, В. П. Дегтярев. — Опул. в Б. И. — 1985, № 5.

9. Супертехнология // Электронная промышленность. — 1989. — № 8. — С. 13.

10. Электронная библиотека. The january 2000 release of the MSDN Library.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ. СИМПОЗИУМЫ

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА ЭлектроТехноЭкспо 2002

Москва, ВВЦ, павильон № 20 30 октября — 2 ноября 2002 г.

- ✓ Электрические машины и аппараты, трансформаторы, источники тока, кабельные изделия, силовые полупроводниковые приборы, электротермические установки, силовые конденсаторы, электроинструмент
- ✓ Электроэнергетика и энергосбережение
- ✓ Электроника, системы автоматизации, средства связи и телекоммуникации
- ✓ Специализированный салон MERA: средства измерения, контроля и автоматизации, метрологическое обеспечение в электроэнергетике
- ✓ Светотехника
- ✓ Бытовые электротехнические изделия, аудио- и видеоаппаратура
- ✓ Специальное технологическое оборудование для производства электротехнических изделий, электронных компонентов и модулей
- ✓ Оборудование для обработки материалов
- ✓ Электротехнические материалы
- ✓ Электротехнические установки экологического назначения
- ✓ Научно-техническая литература

В рамках выставки будет проведен симпозиум
"Электротехника и электроэнергетика в XXI веке: итоги и перспективы".

Оргкомитет: 115093, г. Москва, ул. Люсиновская, 36.

Тел./факс (095) 363-50-32, 363-50-33.

E-mail: electro@mayer.ru

<http://www.mayer.ru/electro>

А. Е. КРЕНДЕЛЕВ

Россия, г. Зеленоград, НИИ "Научный центр"

Дата поступления в редакцию

05.03 2001 г.

Оппонент к. т. н. Н. Ф. КАРУШКИН
(НИИ "Орион", г. Киев)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ ДЛЯ ГИС КВЧ-ДИАПАЗОНА

Обсуждаются технологические задачи в изготовлении ГИС СВЧ миллиметрового диапазона и перспективные пути их решения.

В 1979 г. Всемирная конференция по радиочастотам утвердила план использования частот миллиметрового диапазона выше 40 ГГц. Этот план открывает путь для широкого развития техники крайне высоких частот (КВЧ) — 30–300 ГГц и гипервысоких частот (ГВЧ) — 300–3000 ГГц. Реализация этого плана должна обеспечить возможность проектирования компактных и эффективных по стоимости изготовления систем [1] с учетом совершенствования как технологии полупроводниковых ИС, так и методов тонкопленочной технологии.

Цель настоящего обзора — проанализировать задачи, возникающие в области технологии изготовления СВЧ ГИС миллиметрового диапазона, и обсудить возможные варианты их решения.

Будем рассматривать СВЧ ГИС различной функциональной направленности, т. е. широкий набор устройств на микрополосковых линиях (МПЛ) СВЧ, включая элементы с сосредоточенными параметрами, микрополосковые антенны.

При конструировании таких устройств для КВЧ необходимо при сохранении диэлектрической проницаемости подложки уменьшать геометрические размеры несимметричной МПЛ адекватно укорочению волны. Нетрудно показать, что при уменьшении ширины МПЛ и толщины подложки возрастают относительные погрешности соответствующих слагаемых погрешности волнового сопротивления (δZ). Это вызывает необходимость расчета допусков.

К основным дестабилизирующим факторам, определяющим относительную погрешность волнового сопротивления δZ , относятся:

- разброс значений диэлектрической проницаемости ($\delta\epsilon$);
- разброс подложек по толщине (δh);
- разброс ширины проводника МПЛ (δW).

Если принять, что $\delta\epsilon$, δh , δW имеют нормальный закон распределения (что в большинстве случаев имеет место), то δZ также распределена нормально. Тогда математическое ожидание $M(\delta Z)$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma(\delta Z)$ могут быть определены по формулам

$$M(\delta Z) = m_1 M(\delta\epsilon) + m_2 M(\delta h) + m_3 M(\delta W); \quad (1)$$

$$\sigma(\delta Z) = \{(m_1 \sigma_{\delta\epsilon})^2 + (m_2 \sigma_{\delta h})^2 + (m_3 \sigma_{\delta W})^2\}^{1/2}, \quad (2)$$

где m_1, m_2, m_3 — коэффициенты влияния $\delta\epsilon, \delta h, \delta W$, соответственно;

$M(\delta\epsilon), M(\delta h), M(\delta W)$ — математические ожидания $\delta\epsilon, \delta h, \delta W$;

$\sigma_{\delta\epsilon}, \sigma_{\delta h}, \sigma_{\delta W}$ — среднеквадратические отклонения $\delta\epsilon, \delta h, \delta W$, соответственно.

Коэффициенты влияния определяются по формулам

$$m_1 = (\delta Z / \delta\epsilon) \epsilon / Z; \quad m_2 = (\delta Z / \delta h) h / Z; \quad m_3 = (\delta Z / \delta W) W / Z.$$

$$\delta Z = m_1 \delta\epsilon + m_2 \delta h + m_3 \delta W, \quad (3)$$

при этом $m_2 = -m_3$.

Поскольку допуск на волновое сопротивление определяет точность воспроизведения большинства функциональных параметров устройств на МПЛ, то при реализации рассматриваемых устройств миллиметрового диапазона следует обеспечить более жесткие допуски на величины ϵ, h, W .

Известно, что допуски на геометрические размеры линий передач элементов тракта антенных устройств ужесточаются на порядок при переходе от сантиметрового диапазона к миллиметровому [2]. В общем случае допуск на параметр Z определяется (при заданной допустимой величине выхода годных) как систематической, так и случайной составляющей погрешности. Поскольку систематическая составляющая может быть либо учтена при проектировании изделий, либо устранена совершенствованием технологического процесса (известно, что при хорошо отлаженном технологическом процессе систематическая составляющая погрешности формируемого параметра близка к нулю), то особое значение имеет случайная составляющая погрешности каждого из рассматриваемых параметров.

Более точный анализ предполагает учет влияния изменения ширины проводника МПЛ не только от линии к линии (регулярные отклонения). В силу того, что плотность тока в проводнике МПЛ распространяется неравномерно по его сечению и имеет большее значение на краях, дефекты границы проводника приводят к перераспределению плотности тока, а следовательно, к увеличению потерь, которое можно оценить коэффициентом K_d , показывающим, во сколько раз увеличиваются потери на внешней и

внутренней поверхности полоскового проводника за счет нерегулярности краев. Исходя из того, что при деформации проводника плотность тока в его середине остается постоянной, можно получить [3]:

$$K_d = 1 + 7,2 \Delta_n / W, \quad (4)$$

где Δ_n — глубина дефектов границы проводника.

Нерегулярные отклонения, кроме увеличения потерь в МПЛ, ухудшают точностные характеристики, а именно, увеличивают дисперсию и асимметрию распределения Z МПЛ, расположенных на одной подложке [4].

По аналогичным причинам для устройств миллиметрового диапазона повышаются требования к четкости и однородности границы раздела «диэлектрическая подложка — проводник МПЛ».

Таким образом, задачи создания рассматриваемых устройств миллиметрового диапазона сводятся к задачам выбора:

- материала подложки и технологии ее изготовления;
- методов и технических средств формирования геометрических размеров проводника;
- методов и режимов осаждения, обеспечивающих исключение неоднородностей (дефектов) как по краевым границам МПЛ, так и на границе «подложка — проводник».

Во многом успех в создании устройств миллиметрового диапазона определяет подложка МПЛ ГИС СВЧ. Диэлектрическая подложка исполняет роль несущего и канализирующего энергию компонента. Поэтому ее физико-технические характеристики оказывают влияние практически на все функциональные параметры устройства. Напри-

мер, импеданс и затухание в микрополосковых линиях, добротность резонаторов и воспроизводимость их параметров прямо связаны с такими характеристиками подложек как диэлектрическая проницаемость ϵ , тангенс диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$, однородностью указанных характеристик на поверхности и в объеме, а также качеством обработки поверхности подложки.

К диэлектрическим подложкам СВЧ ГИС миллиметрового диапазона предъявляются следующие требования:

- минимальные диэлектрические потери ($\text{tg}\delta < 10^{-4}$);
- высокая однородность структуры и состава (воспроизводимость величины ϵ на поверхности и в объеме подложки и в партии подложек);
- высокое качество обработки поверхности (не хуже 14 класса);
- высокая точность воспроизведения толщины (неравномерность в пределах одной подложки, разброс средних значений параметра в партии подложек);
- высокая механическая прочность;
- химическая стойкость к различным активным средам;
- возможность изготовления подложек различных размеров, включая крупноформатные;
- материал подложки должен способствовать (при соответствующей обработке) прочному сцеплению пленок металлов, характеризующихся высокой проводимостью (Cu, Al), с ее поверхностью.

Указанным требованиям в определенной мере удовлетворяют подложки из ряда неорганических и органических материалов. Характеристики подложек,

Таблица 1

Характеристики подложек из неорганических диэлектриков

Материал	Марка	Преимущества	Недостатки	Характеристики				
				ϵ ($f=10$ ГГц)	$\text{tg}\delta$ ($f=10$ ГГц)	λ , $\left(\frac{\text{ккал}}{\text{см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ \text{C}} \right)$	Прочность, кгс/мм ²	Пористость, % объема
Al ₂ O ₃ 99,5	Поликор А-995	Высокие диэлектрические, механические, тепловые свойства	Неоднородность, анизотропия	9,6	$1 \cdot 10^{-4}$	0,07	30	3,0
	Поликор А-995К	То же + однородность свойств	Точность в достижимой толщине	9,75	$1 \cdot 10^{-4}$	0,07	32	1,0
Лейко-сапфир (20...100)	—	Монолитная беспористая структура	Сильная анизотропия ϵ и ТКЛР	9...12	$< 1 \cdot 10^{-4}$	0,07	35	0
Ситалл (0,5)	СТ-32	Высокооднородная беспористая структура, однородность свойств	Низкая теплопроводность, неустойчивость	10,0	$3 \cdot 10^{-4}$	0,007	13	0
	СТ-36			5,6	$2 \cdot 10^{-4}$	0,008	15	0
Кварцевое стекло (0,1...0,5)	КВ	Высокостабильное значение ϵ , высокооднородная беспористая структура	Низкие теплопроводность, ТКЛР	3,85	$1 \cdot 10^{-4}$	0,002	10	0
Керамика BeO	ОБ-1	Высокая теплопроводность	Неоднородность, дефектность, токсичность	6,6...7,0	$(2...3) \cdot 10^{-4}$	0,4...0,5	20	5,5

выполненных из наиболее перспективных *неорганических* диэлектриков, представлены в **табл. 1**.

Наиболее полно изложенным требованиям удовлетворяют подложки из лейкосапфира. Поскольку имеются сведения о возможности на этапе конструирования учесть анизотропию свойств подложки, становится незначимым основной недостаток лейкосапфира (сильная анизотропия ϵ и ТКЛР). Однако подложки из лейкосапфира пока дороги (в 20–100 раз дороже подложек из поликора). Требованиям по электрическим характеристикам удовлетворяют также подложки из окиси алюминия (А-995К), выгодно отличающиеся от других материалов высокой теплопроводностью и механической прочностью.

Основная проблема в изготовлении подложек из неорганических материалов — трудность достижения малых толщин, обеспечивающих их использование в диапазоне КВЧ. Существующая технология изготовления подложек из поликора позволяет получать подложки толщиной 250 мкм и выше. Для получения подложек меньшей толщины могут быть применены перспективные методы и процессы, позволяющие формировать диэлектрические слои на металлических подложках. Среди таких методов можно назвать:

- метод электрофореза (требуется последующая высокотемпературная обработка структуры «металлическая подложка — диэлектрический слой»);
- метод плазмоструйного нанесения.

Свойства *органических* материалов, используемых для подложек СВЧ ГИС, приведены в **табл. 2**. Указанные материалы обеспечивают сравнимость этих подложек с подложками из неорганических материалов по электрическим и механическим свойствам и более низкую стоимость. Кроме того, следует отметить возможность получения СВЧ ГИС больших размеров и получение малой (менее 200 мкм) толщины подложек при использовании пленок из фторопласта и полистирола.

Наиболее часто применяются материалы, представляющие собой смесь тефлона со стеклом с плетеной или микроволоконистой структурой, в частности, дюроид марок 5880 и 5870 с диэлектрической проницаемостью 2,33 и 2,2 и тангенсом угла диэлектрических потерь $5 \cdot 10^{-4}$ и $6 \cdot 10^{-4}$, соответственно. К менее распространенным материалам относятся полистироловые смолы (как с наполнителем, так и без них), имеющие $\epsilon=2,6$.

Новый материал фирмы Rogers Corp дюроид 6010 представляет собой смесь тефлона со стеклянным порошком. Он сопоставим по $\epsilon \approx 10,5 \pm 0,25$ с окисью алюминия. Отмечается [5], что применение этого материала позволяет в два раза уменьшить габариты схемы по отношению к дюроиду марки 5870. В отличие от керамики, он легко подвергается резке и сверлению. По оценке специалистов, схемы на подложках из этого материала должны быть в пять раз дешевле схем на подложках из окиси алюминия. Некоторые разработчики проектируют ВЧ-блок систем РПД, выполненных целиком на одной плате из материала типа 6010 [6], в то время как при использовании окиси алюминия для изготовления таких блоков требуется несколько плат с проволочными межсоединениями.

Таблица 2

Характеристики подложек из органических диэлектриков

Материал подложки	$\text{tg}\delta$	ϵ	Диапазон рабочих температур, °C	Стоимость
Тефлон без наполнителя	$4 \cdot 10^{-4}$	2,10	–27...+260	Высокая
Тефлон со стеклянным наполнителем плетеной структуры	$9 \cdot 10^{-4}$	2,17	–27...+260	Средняя
	$15 \cdot 10^{-4}$	2,33		
	$18 \cdot 10^{-4}$	2,45		
	$22 \cdot 10^{-4}$	2,55		
Тефлон со стеклянным наполнителем с неупорядоченной микроволоконистой структурой	$9 \cdot 10^{-4}$	2,17	–27...+260	Между средней и высокой
	$15 \cdot 10^{-4}$	2,35		
Тефлон с кварцевым наполнителем	$6 \cdot 10^{-4}$	2,47	–27...+260	Высокая
Полистирол сетчатой структуры с кварцевым наполнителем	$5 \cdot 10^{-4}$	2,65	–27...+260	Между средней и высокой
Полистирол сетчатой структуры с наполнителем из керамического порошка	$5 \cdot 10^{-4}$	3...15	–27...+110	То же
	$15 \cdot 10^{-4}$			
Полистирол сетчатой структуры со стеклянным наполнителем	$1 \cdot 10^{-3}$	2,62	–27...+110	Низкая
Кремнийорганическая смола с наполнителем из керамического порошка	$5 \cdot 10^{-4}$	3,25	–	Высокая
	$4 \cdot 10^{-3}$			

К новым пластмассовым материалам относится слоистый пластик марки Micaply 5032 (фирма Mica Corp) с $\epsilon=4,8$ и $\text{tg}\delta=0,01$, композиционный материал марки Epsilon-10 (фирма 3M Corp) с $\epsilon=10$ и $\text{tg}\delta=0,002$, материал серии 800 (фирма Keene Corp). Этот класс материалов используется для изготовления ГИС КВЧ на микрополосковых линиях и служит для замены окиси алюминия.

Армирование тефлона с помощью случайно диспергированных стеклянных микроволокон вместо плетеной стекловолоконистой структуры позволяет снизить ВЧ-потери. Подложки на основе такого тефлона характеризуются высокой однородностью ϵ в широком диапазоне частот. Такие подложки подвергаются травлению при температуре до 52°C, отверстия металлизуются гальваническим способом при температуре до 60°C. Обеспечивается высокая точность получения резко очерченных линий с незначительным подтравливанием. При необходимости материал может обрабатываться при более высоких температурах. Кроме того, в таких подложках легко пробиваются отверстия, они хорошо режутся; гальваническое покрытие в них надежнее, чем у тефлоновых пластин, армированных плетеным стекловолокном.

Случайное диспергирование стеклянных волокон в тефлоновой матрице позволяет получать очень низкий коэффициент анизотропии, определяющий соотношение диэлектрических постоянных, измеренных в горизонтальной и вертикальной плоскости подложки (что особенно

Таблица 3

Характеристики полимерных пленок

Материал	ϵ ($f=10$ ГГц)	$\text{tg}\delta$ ($f=10$ ГГц)	K_T , Вт/(м·°С)	ТКЛР·10 ⁵	Примечания
Фторопласт	2	$3 \cdot 10^{-4}$	0,23	8...23	—
Стирол	3...16	9...30	0,2...0,5	3...10	Малая химическая устойчивость
Полиэтилен	2,5	5	0,22	2,4	Низкая теплостойкость
Арилокс	2,5	6	0,21	5,2	Низкая стойкость к ароматическим углеводам

важно при изготовлении резонаторов с узкими щелями связи). Для плат из нового материала типов 5880 и 5870 коэффициент анизотропии изменяется в интервале 1,02...1,04 (а у тефлоновых пластин, армированных плетеным стекловолокном, — 1,09...1,19).

Опытные образцы подложек из материалов, приведенных в табл. 2, имеют самый низкий для диэлектрических подложек допуск на ϵ ($\pm 0,01$). Для плат с номинальной толщиной $\approx 0,78$ мм и $\approx 3,17$ мм могут быть получены допуски на толщину $\pm 0,01$ и $\pm 0,05$, соответственно.

В настоящее время разрабатываются материалы с $\epsilon=6$ для подложек с промежуточной величиной потерь. Созданы платы со сверхтонким слоем фольги (5—9 мкм) и с толстыми заземляющими пластинами. Получены подложки как с односторонним, так и с двухсторонним фольгированием, толщина которых изменяется в широком диапазоне.

Однако, по мнению специалистов, наиболее перспективным материалом является тефлон со стеклянными наполнителем плетеной структуры. Его основные преимущества: высокая стабильность размеров подложки, возможность жесткого контроля ϵ , хорошее согласование по температурному коэффициенту расширения с медью, высокое сродство к меди, низкая хладнотекучесть, стойкость к химическому воздействию, простота механической обработки, способность работать в широком диапазоне температур, возможность изготовления крупноформатных подложек (91,44×91,44 см).

Согласно прогнозам, предпочтение в будущем по-прежнему будет отдаваться подложкам из материала на основе тефлона, а для мм-диапазона перспективным будет использование подложек из чистого тефлона с низкими потерями (см. табл. 2).

Вместе с тем в качестве перспективного рассматривается и направление полимерных материалов. Основные характеристики полимерных пленок, выпускаемых отечественной и зарубежной промышленностью, приведены в табл. 3.

Использование приведенных в таблице материалов в качестве подложек СВЧ ГИС может дать положительные результаты. Особое внимание заслуживают пленки из фторопласта, однако их применение в качестве подложек требует решения проблемы адгезии металлических слоев к этому материалу.

Известные исследования микрополосковых узлов показали возможность получения параметров

СВЧ ГИС, изготовленных на подложках с $\epsilon=35...90$, не уступающих достигнутому в настоящее время для ГИС на подложках с $\epsilon=10$. Полученное уменьшение размеров схемы обеспечило 2—5-кратное снижение стоимости платы СВЧ ГИС, а также улучшение массогабаритных характеристик.

Остается заманчивым использование в качестве подложки для СВЧ ГИС арсенида галлия. В этом случае возможно в перспективе

изготовление монолитного СВЧ-устройства, содержащего как активные компоненты, так и МПЛ. (Реальное значение толщины полупроводниковых пластин, применяемых в производстве, в настоящее время составляет ≈ 200 мкм. Поэтому частотный диапазон СВЧ ГИС на арсениде галлия может быть ограничен 100 ГГц.)

Выбор материала подложки и способов ее изготовления могут обеспечить достижение малых значений толщины h , высокой идентичности h и ϵ в пределах подложки и в партии подложек. В то же время комплексный подход к проблеме создания устройств миллиметрового диапазона диктует необходимость существенного повышения точности формирования размеров топологического рисунка, а также разрешающей способности методов формирования проводников в случае изготовления элементов с сосредоточенными параметрами.

Точность критичных размеров, например ширины МПЛ W , определяется процессами литографии и травления. Современные методы фотолитографии, применяемые при изготовлении полупроводниковых СБИС, позволяют уверенно формировать проводники шириной 1 мкм и выше с достаточной точностью (погрешность совмещения $\pm 0,15$ мкм и фокусировки в пределах 0,5 мкм), однако при этом площадь топологического рисунка не превышает 10×10 мм. Использование проекционной печати позволяет (с помощью мультипликации) проецировать проводники МПЛ на площадь достаточно больших размеров (например, 100×100 мм). Следует ожидать, что при ширине МПЛ миллиметрового диапазона порядка 20—30 мкм точность формирования этой величины будет определяться процессами травления. Поэтому актуальна задача выбора метода и технологических средств осуществления этого процесса.

Основные недостатки широко применяемого в технологии СВЧ ГИС процесса жидкостного химического травления (ЖХТ) — изотропность и слабая управляемость — являются принципиально ограничивающими точность формирования МПЛ. Увеличение точности можно обеспечить применением управляемых процессов ионного травления [7].

Существует две разновидности ионного травления: ионно-плазменное (ИПТ) и ионно-лучевое (ИЛТ). При ИПТ подложка помещается в зону плазмы газового разряда, а при ИЛТ — в вакуумную зону, отдаленную от области плазмы. ИЛТ, по сравнению с ИПТ, обладает следующими преимуществами:

- высоким показателем анизотропии;
- меньшим радиационным воздействием заряженных частиц и фотонов (из-за отдаления рабочей камеры от источника);
- меньшим загрязнением образцов инородными частицами;
- возможностью независимой регулировки угла падения пучка ионов (это позволяет управлять профилем травления).

Результаты сравнения ЖХТ с ИПТ и ИЛТ представлены в **табл. 4** [5,8].

Таблица 4

Сравнительные характеристики методов травления

Параметр	Вид травления		
	ЖХТ	ИПТ	ИЛТ
Показатель анизотропии (отношение скоростей травления по перпендикуляру и по касательной к поверхности)	0,5...1	5...10	10...100
Скорость травления, нм/мин	15	0,1...1	0,3...3
Обеспечиваемая разрешающая способность, лин/мм	250	2000	3000
Среднеквадратическое отклонение подтрав по подложке при толщине слоя 1 мкм	6,2	1,5	0,2

Преимущества метода ИЛТ заключаются в более высокой точности и разрешающей способности этого метода, а также в возможности автоматизации, экологической чистоте и экономичности.

Ионно-лучевое травление как метод формирования топологического рисунка ГИС СВЧ может быть реализован при помощи источников ионов (ИИ) типа Кауфмана или источников, выполненных на базе ускорителей ионов анодным слоем (УАС). Представителем первых является ИИ МАИ 208 2Т, представителем вторых — широко применяемый в промышленности источник “Радикал”.

Последний формирует трубчатый поток ионов, захватывающий небольшую площадь обработки. Применение этого источника для обработки подложек размерами 48×60 мм требует их перемещения в зоне травления. ИИ “Радикал” работает при напряжении разряда более 1 кВ. Это вызывает усиленное распыление стенок разрядной камеры и загрязнение ионного пучка. Ввиду отсутствия у этого источника ионно-оптической системы поток ионов имеет размытый энергетический спектр.

Ряд недостатков источника “Радикал” устранен в ИИ, выполненном на базе ускорителя с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения (источники УЗДП [6]). Этот источник обладает мягким энергетическим спектром (диапазон энергии ионов 50...500 эВ, плотность ионного тока 2...20 мА/см²). ИИ УЗДП имеет овальную форму канала ускорения, что позволяет обеспечить равномерность травления перемещением подложки только в одном направлении — перпендикулярно протяженным участкам канала анода.

Для формирования топологического рисунка ГИС СВЧ, размещаемых на достаточно больших площадях (48×60 мм и более), целесообразно использо-

вать ИИ типа Кауфмана в варианте МАИ 208 2Т [9] (см. **табл. 5**, где неравномерность травления соответствует оптимальному режиму работы ИИ).

Таблица 5

Сравнительные характеристики источников ионов

Тип источника ионов	Плотность тока, мА/см ²	Диапазон энергий, эВ	Размер пучка, мм	Неравномерность травления неподвижного образца
МАИ 208 2Т	0,5...3,0	500...2000	100	5% на Ø300 мм
УЗДП	5,0...25,0	2...20	—	5% на 40×40 мм

Таким образом, существенного улучшения точности получения геометрических размеров (уменьшения случайной составляющей погрешности) можно добиться методом ионного травления, реализованным с помощью ионного источника типа Кауфмана. При этом из существующих моделей источников этого типа следует отдать предпочтение источнику МАИ 208 2Т, обеспечивающему высокую равномерность травления на достаточно большой площади.

Применение этого метода обеспечивает также более четкое (по отношению к применяемому методу жидкостного травления) формирование края проводников. Исключение неоднородностей на границе «подложка — проводник» может происходить за счет:

- применения подложек, имеющих высокий класс чистоты обработки поверхности;
- нанесения материалов проводников без нанесения адгезионного подслоя.

Решение первой задачи обеспечивается выбором материала подложки, решение второй — выбором для данного материала подложки материала проводящего слоя и соответствующего метода и режима нанесения.

Выбор материала проводящего слоя весьма ограничен. Высокой проводимостью обладают медь, алюминий, золото, серебро, а также сплавы этих материалов. Высокая адгезия к подложке любого материала обеспечивается образованием химических связей этого материала с материалом подложки. Более всего такие связи могут возникнуть у алюминия к подложкам, содержащим в своем составе окислы (некомпенсированные кислородные связи вступают во взаимодействие с Al, имеющим высокое значение теплоты образования окисла). Вероятность образования химических связей повышается при активации поверхности подложки энергетическим воздействием. Поэтому предпочтение следует отдавать методам, обеспечивающим высокие энергии атомов молекул распыляемого материала.

К таким методам следует отнести, прежде всего, магнетронное и ионно-плазменное распыление материалов. Известно, что применение магнетронного метода обеспечивает получение толстых пленок (10 мкм) металлов и сплавов на различные подложки, включая полимерные [10]. Высокая адгезия достигается подбором оптимального режима распыления (температура подложки, давление рабочего газа).

Таким образом, основные задачи реализации пленочных ГИС сверхвысоких и крайне высоких частот состоят в выборе материала подложки, методов

точного формирования проводников (малое значение случайной составляющей погрешности), методов и режимов осаждения металлов с высокой проводимостью без адгезионного подслоя.

Указанные задачи с большей вероятностью могут быть успешно решены при применении полимерных подложек (например, фторопластовых), методов ионного травления с использованием источника ионов типа Кауфмана, имеющего ионно-оптическую систему, и при использовании магнетронного распыления металлов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Tokumitsu Y., Ishizaki M., Iwakuni M., Saito T. 50-GHz Ic components using alumina substrates // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. — 1983. — Vol. MTT-31, N 2. — P. 121—128
2. Воскресенский Д. И., Максимов В. М. и др. Антенны и устройства диапазона миллиметровых волн // Радиоэлектроника. — 1985. — Т. 28, № 2. — С. 4—23.
3. Бушминский И. П., Гудков А. Г. Экспериментальные исследования потерь в МПЛ // Вопросы радиоэлектроники. — 1982. — Вып. 2. — С. 88—94.
4. Бушминский И. П., Гудков А. Г., Куратов П. А. Вероятностное моделирование волнового сопротивления МПЛ // Вопросы радиоэлектроники. — 1982. — Вып. 6. — С. 38—53.

5. Сухие методы травления в производстве ИС // Радиоэлектроника за рубежом. — 1985. — № 15. — С. 5—28.

6. Ким В., Киреев В. Ю. Ионно-лучевое травление материалов ионами низких энергий // Электронная техника. Сер. Микроэлектроника. — 1983. — Вып. 3. — С. 69—74.

7. Данилин Б. С., Киреев В. Ю., Кузнецов В. И. Вакуумно-плазменные процессы травления микроструктур. Классификация и сопоставление процессов травления. Генерация химически активных частиц в низкотемпературной плазме // Электронная техника. Сер. Материалы. — 1982. — Вып. 2. — С. 3—9.

8. Орлов В. И. Применение ионно-плазменных процессов в производстве изделий электронной техники // Обзоры науч.-техн. литературы по электронной технике. Сер. Технология, организация производства и оборудование. — 1979. — Вып. 11.

9. Григорян В. Г., Гущин М. Б., Иванов Р. Д. и др. Ионно-лучевой источник для травления рисунка ИС с микронными и субмикронными размерами элементов // Электронная техника. Сер. Микроэлектроника. — 1979. — Вып. 2. — С. 106—111.

10. Воробьев В. Н. Выбор оптимальных режимов магнетронного распыления при металлизации полимерных подложек // Электронная техника. Сер. Материалы. — 1985. — Вып. 7. — С. 65—70.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ. СИМПОЗИУМЫ

4-я Международная научно-техническая конференция **«ЭЛЕКТРОНИКА И ИНФОРМАТИКА — 2002»** («ЭлИнф-2002»)

Россия, Москва,
 МИЭТ (технический университет)
 20—22 ноября 2002 г.

Научные направления

- | | |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Физика и технология микро- и нано-электроники. 2. Материалы и оборудование электронной техники. 3. Проектирование электронных компонентов и систем. 4. Микросистемы и микромеханика. 5. Информационные и управляющие системы. | <ol style="list-style-type: none"> 6. Телекоммуникационные системы и связь. 7. Биомедицинская электроника. 8. Экологические аспекты микро- и наноэлектроники. 9. Менеджмент и маркетинг в электронике и информатике. 10. Гуманитарные проблемы информатизации. |
|--|---|

Адрес Оргкомитета:

103498, Москва, К-498,
 Московский государственный институт
 электронной техники (МИЭТ), ОНТИ.

Отв. секретарь Харач Валентина Павловна.

Тел.: (095) 532-98-30. Факс: (095) 530-54-29. E-mail: id@rnd.miee.ru

Д. ф.-м. н. З. А. ИСКЕНДЕР-ЗАДЕ,
д. ф.-м. н. Ф. Д. КАСИМОВ, С. А. ИСМАЙЛОВА

Азербайджан, г. Баку, Азербайджанский технический ун-т,
ОКБ космического приборостроения
E-mail: ssddb@azerin.com

Дата поступления в редакцию
23.01—16. 07 2002 г.

Оппонент к. т. н. В. И. ЗОЛОТАРЕВСКИЙ
(НИИ МП, г. Киев)

КОСВЕННЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ НАГРЕВ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОСХЕМ

Полученные высококачественные монокристаллические слои позволяют изготавливать в них элементы функциональных микросхем, в частности, датчики Холла.

Непрерывное повышение степени интеграции и функциональной сложности интегральных схем (ИС) диктует необходимость уменьшения числа высокотемпературных операций, их длительности и температуры. Быстрые термические обработки, для которых могут быть использованы потоки электронов, неогерентное излучение или лазерная технология, наилучшим образом соответствуют этой задаче [1].

Наиболее перспективным из вышеперечисленных процессов является лазерная технология обработки полупроводниковых материалов [2, 3], отличающаяся высокой локальностью, импульсным характером и селективностью воздействия на обрабатываемые элементы. Она позволяет получить качественно новые структуры и сделать первый шаг к созданию “трехмерных” ИС [4], элементы которых располагаются как в изолированной окислом пленке, так и в подложке. Лазерная рекристаллизация пленок поликристаллического кремния (ППК) увеличивает размер их зерен до нескольких десятков микрон, что позволяет использовать рекристаллизованную пленку для создания активных приборов.

Интересные результаты с точки зрения формирования монокристаллических областей большого размера получены с использованием сканирующего лазерного излучения непрерывного действия, особенно в технологии “кремний-на-изоляторе”, поэтому изучение методов рекристаллизации слоев кремния и возможностей их использования в технологии изготовления ИС представляет большой научный и практический интерес. Лазерная технология позволяет вплотную подойти к решению проблемы создания интегральных микросистем, в которых на одном кристалле, помимо “интеллектуальных” сенсоров (smart sensor), размещаются также и силовые элементы (smart power), преобразующие сигналы чувствительных элементов от внешних воздействий [5].

Рекристаллизация ППК обычно производится аргоновым лазером непрерывного действия с длиной волны 0,51 мкм в режиме сканирования луча. Ранее было показано, что подвижность носителей в

канале МОП-транзистора, изготовленного в рекристаллизованной лазерным лучом ППК, составляет порядка 350 см²/В·с [6]. Контрольные приборы, сформированные в ППК, характеризовались подвижностью ~20 см²/В·с, а подвижность в транзисторах, изготовленных в монокристаллической подложке, была порядка 700 см²/В·с. Следовательно, рекристаллизованная ППК по своим свойствам приближается к монокристаллической.

Однако непосредственный лазерный нагрев имеет и свои недостатки, связанные с возникновением дефектов в рекристаллизованном кремнии. В [7] было показано, что вследствие меньшей плотности напыленных слоев по сравнению с монокристаллическими в эпитаксиальном слое после лазерной обработки могут наблюдаться микропузырьки и сферические пустоты. В связи с этим мы использовали метод косвенного лазерного нагрева [8], при котором поглощение лазерного излучения происходит в тонкой пленке тугоплавкого металла, расположенной над поликремнием и отделенной от него слоем диэлектрика. Расплавление поликремниевой пленки для последующей рекристаллизации происходит в результате теплового потока от нагретого металла через слой диэлектрика. Такой метод обладает рядом достоинств: возможно применение любых лазеров, отсутствует непосредственное взаимодействие лазерного излучения с ППК, повышена стабильность процесса рекристаллизации.

Нами использовался твердотельный лазер непрерывного действия с длиной волны 1,06 мкм, в качестве тугоплавкого металла был выбран молибден, обладающий близким к кремнию коэффициентом термического расширения и высокой адгезией к кремнию и его окислу. Недостатком молибдена является то, что при высокой температуре он легко окисляется. Для предупреждения этого явления на поверхность металла наносили слой двуокиси кремния, одновременно служащий антиотражающим покрытием.

Согласно [9, с. 32], экстремальные значения пропускания антиотражающего покрытия могут иметь место при определенных толщинах окисной пленки d_1 на данной длине волны λ , которые определялись по формуле

$$d_1 = \frac{\lambda}{4\pi n_1} \arctg \frac{2n_1 k_2}{n_1^2 - n_2^2 - k_2^2}, \quad (1)$$

где n_1 и n_2 — показатели преломления окисной пленки и подложки;

k_2 — показатель пропускания.

Правильным выбором показателя преломления n_1 и толщины пленки d_1 можно свести отражение от первой поверхности к минимуму. Поскольку коэффициент k вносит лишь незначительный фазовый сдвиг, он, в случае кремния, не влияет на положение максимума и минимума кривой зависимости пропускания от длины волны, и поэтому хорошим приближением выражения (1), согласно [9, с. 35], является следующая формула:

$$d_1 = (2l + 1) \frac{\lambda}{4n_1} \quad (l = 1, 3, 5 \dots) \quad (2)$$

Измерения показали, что при толщине пленки окисла ~0,2 мкм коэффициент отражения от поверхности при воздействии лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм составляет порядка 30%. Наличие на поверхности молибдена антиотражающего покрытия также стабилизирует процесс рекристаллизации ППК ввиду постоянства величины поглощаемой энергии в процессе обработки.

Толщина подслоя SiO_2 выбрана 0,9 мкм, ППК — 5 мкм, второй слой SiO_2 — 0,2 мкм, молибдена — 0,3 мкм, антиотражающей пленки SiO_2 — 0,2 мкм. Рекристаллизация проводилась путем сканирования лучом непрерывного лазера по поверхности структуры. Мощность излучения изменялась в пределах 15—30 Вт, скорость сканирования — 10 см/с, температура подложки — 450°C. Конструкция полученной структуры показана на рис. 1.

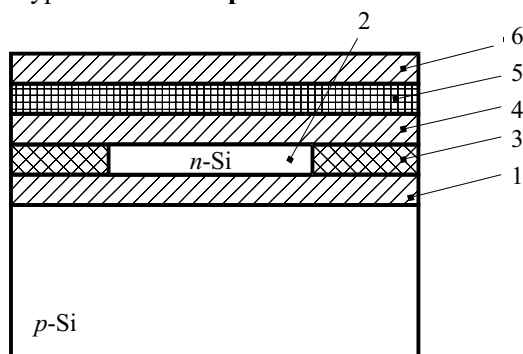


Рис. 1. Конструкция структуры с рекристаллизованной пленкой кремния (РПК):

1 — подслой SiO_2 ; 2 — РПК; 3 — ППК; 4 — слой SiO_2 ; 5 — молибден; 6 — антиотражающая пленка SiO_2

В результате локальной рекристаллизации ППК получались участки монокристаллической рекристаллизованной пленки кремния (РПК), в которых можно изготавливать элементы ИС, и участки ППК, которые можно использовать в качестве чувствительных элементов различных неэлектрических величин [10]. Подробнее технология косвенного лазерного нагрева описана в [8], а также в [11].

После проведения рекристаллизации слои антиотражающего окисла и молибдена стравливаются.

Исследования показали, что РПК, сформированная косвенным лазерным нагревом, обладает высокими электрофизическими параметрами.

Исследовались параметры p — n -переходов, сформированных в РПК n -типа проводимости с удельным сопротивлением 2 Ом·см. Анализ распределения концентрации примесей, проведенный с помощью зондовых измерений (рис. 2), показал высокое качество p — n -перехода.

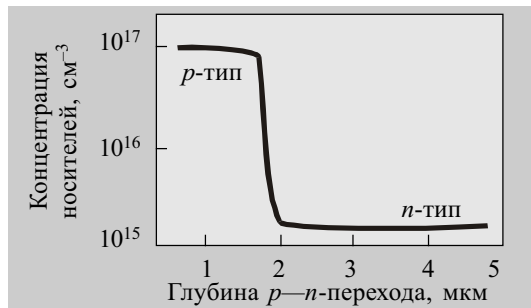


Рис. 2. Распределение концентрации носителей в p — n -переходе, сформированном в РПК

Коэффициент неидеальности вольт-амперной характеристики p — n -перехода в РПК составлял 1,2. Пробивные напряжения при токе утечки 1 мкА составляли примерно 35 В. Коэффициент усиления тока β , как известно, зависит от параметров эмиттерной и базовой областей и определяется по формуле

$$\beta = \frac{\rho_B L_{nE}}{\rho_E X_B} \quad (3)$$

где ρ_B и ρ_E — удельные сопротивления базовой и эмиттерной областей;

L_{nE} — диффузионная длина электронов в эмиттерной области;

X_B — толщина базового слоя.

Изменение этих величин в процессе лазерного отжига отражается на значении коэффициента усиления по току.

Из профилей распределения концентрации примесей рассчитывали удельное сопротивление эмиттерного слоя ρ_E , а на основе этого — и коэффициент усиления β , величина которого соответствовала значениям контрольных p — n -переходов, изготовленных в монокристаллических участках пластины КЭФ-2 в едином технологическом цикле.

Использование лазерной технологии позволяет создать в РПК различные чувствительные элементы, схемы преобразования сигналов которых могут располагаться в нижнем слое подложки. Нами в РПК был изготовлен датчик Холла (ДХ), что дало возможность повысить его надежность и уменьшить общую площадь магниточувствительной ИС по сравнению с ранее разработанной твердотельной магнитокоммутируемой ИС [12].

Если в РПК изготовить дискретные ДХ, то ввиду отсутствия в них изолирующих p — n -переходов температурный диапазон работы ДХ расширяется до 250°C. Использование полной диэлектрической изоляции с естественным стоп-слоем в виде скрытого слоя позволило защитить прибор от паразитных эффектов со стороны соседних элементов, а также получить малую толщину пленки, что повысило его магниточувствительность до значения 40 мкВ/мА·Гс, которое не уступает лучшим образцам известных ана-

логов, изготавливаемых по традиционной технологии. Измерения подвижности носителей заряда, проведенные с помощью эффекта Холла, дали значения порядка $700 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, что находится на уровне значения подвижности в монокристаллических пленках соответствующей толщины.

Проведенные исследования и полученные результаты показывают перспективность использования лазерной технологии для создания функциональных микросхем, чувствительные элементы и схемы преобразования сигналов которых располагаются на разных уровнях — в рекристаллизованной изолированной пленке и подложке.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Агеев О. А., Светличный А. М., Кочеров А. Н. Влияние геометрии установки БТО на равномерность облученности пластин диаметром 100 мм // Труды 7-й междунар. НТК "Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники". Ч. 1.— Таганрог—Дивноморское.— 2000.— С. 68—69.
2. Пилипенко В. А., Попов Ю. П. Использование фотонных технологических процессов при изготовлении биполярных интегральных микросхем // Электронная промышленность.— 1988.— Вып. 5.— С. 3—9.
3. Paustovsky A. V., Sheludko V. E. Use of laser technology for modification of material properties // Functional Materials (Kharkiv).— 1999.— Vol. 6, N 5.— P. 964—976.
4. Королев М. А. Проблемы создания трехмерных СБИС // Материалы электронной техники.— М.: МИЭТ.— 1986.— С. 126—131.

5. Королев М. А., Шумский И. А. "Интеллектуальные" измерительные микросистемы на основе структуры кремний-на-изоляторе // Известия вузов. Электроника.— 1998.— № 5.— С. 34—38.

6. Королев М. А., Касимов Ф. Д., Исмаилова С. А., Гусейнов Я. Ю. Изготовление приборов в рекристаллизованной лазерным излучением пленке поликристаллического кремния // Труды 3-й междунар. НТК "Микроэлектронные преобразователи и приборы на их основе".— Баку—Сумгаит, 2001.— С. 85.

7. Yehuda Zeiri. Laser induced thermal desorption // J. of Chemical Physics.— 1988.— Vol. 88, N 6.— P. 3981—3987.

8. Королев М. А., Молоствов А. Н., Хохлов М. В. Исследование особенностей рекристаллизации поликремниевых пленок под воздействием лазерного излучения // Электронная техника. Сер. Микроэлектроника.— 1986.— № 1.— С. 81—84.

9. Полупроводниковые формирователи сигналов изображения // Под ред. П. Йесперса.— М.: Мир, 1979.

10. Касимов Ф. Д. Физические свойства и функциональные возможности локально выращенных пленок моно- и поликристаллического кремния // Тез. докл. 12-й Всесоюз. конф. по микроэлектронике. Ч. 2.— Тбилиси, 1987.— С. 175—176.

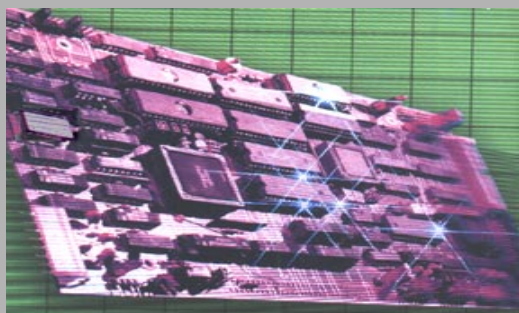
11. Глазов В. М., Королев М. А., Тадевосян С. Г. Исследование и разработка метода косвенного лазерного нагрева для создания трехмерных КМДП ИС ЗУ // Тез. докл. Всесоюз. конф. "Исследование и разработка перспективных ИС памяти".— Москва, 1986.— С. 47.

12. Kasimov F. D., Ismailov N. M., Kasimova F. F. High magnetic sensitivity integrated circuit on the base of Hall-effect sensor // Functional Materials (Kharkiv).— 1998.— Vol. 5, N 1.— P. 138—139.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ. СИМПОЗИУМЫ

II промышленная специализированная выставка
Электронные компоненты и комплектующие, материалы,
печатные платы, конструктивы, технологии,
оборудование, разработки, продукция,
сертификация, сервис

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА
И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ



2002 г.
19—22 ноября
Санкт-Петербург

Пр. Гагарина, 8
Петербургский СКН
Т/ф. (812) 1183537, 2303116
E-mail: radel@orticon.com,
it@mailbox.alkor.ru
Http: [//www.orticon.com/radel.html](http://www.orticon.com/radel.html)
[//www.alkor.ru/~00071800](http://www.alkor.ru/~00071800)

Д-р Р. ТАРОЗАЙТЕ, д-р О. ГИЛЕНЕ

Литва, г. Вильнюс, Институт химии
E-mail: rimata@ktl.mii.lt

Дата поступления в редакцию
24.05 2002 г.

Оппонент М. Г. ВЕТЧИКИНА
(СКБ "Молния", г. Одесса)

РЕГЕНЕРИРУЕМЫЙ ЦИТРАТНЫЙ РАСТВОР ХИМИЧЕСКОГО НИКЕЛИРОВАНИЯ

Слабокислый цитратный раствор химического никелирования содержит ускоряющую и стабилизирующую добавки, отличается достаточно высокой скоростью осаждения покрытий.

Хотя никелевые покрытия, осаждаемые химическим путем при использовании гипофосфита, уже давно нашли широкое применение в приборостроительной, электронной и других отраслях промышленности, исследование их осаждения продолжается.

Ni—P-покрытия имеют ряд преимуществ перед электрохимическим никелем в силу таких свойств как микротвердость, стойкость к износу и коррозии. Эти свойства зависят от состава, pH и температуры раствора, т. е. от условий осаждения покрытий [1], т. к. при этом в них меняется содержание фосфора, добавок и примесей.

Наиболее широко на практике применяют кислотные растворы химического никелирования. Они более стабильны, им свойственно высокое содержание фосфора (6—12 мас.%). Покрытия, содержащие низкое количество фосфора, могут быть определены как твердый раствор микрокристаллитов 5—10 нм *fcc*-фазы, тогда как покрытия с высоким содержанием фосфора являются аморфными. Микротвердость и коррозионная стойкость покрытий увеличиваются после их термической обработки. При этом происходят фазовые превращения с образованием Ni_3P *bcc*- и *Ni fcc*-фаз [2, 3]. Процесс кристаллизации аморфного Ni—P-раствора до конечных фаз включает промежуточные стадии.

Ni—P-покрытия отличаются малопористостью. Исследование влияния микроструктуры стальной основы на количество пор в покрытии показало, что пористость покрытий увеличивается с увеличением содержания углерода в стальном сплаве [4].

В последнее время немало внимания уделяется получению покрытий определенного стабильного состава и свойств с применением длительного использования корректируемых растворов [5]. Проведено математическое моделирование процесса, на основе которого могут быть созданы системы управления качеством химического никелирования при длительном использовании растворов [6].

Состав раствора химического никелирования имеет важное значение не только для получения опреде-

ленного свойства покрытий, но и для решения экологических проблем. Длительное использование растворов позволяет не только экономить реактивы, но и значительно снизить выбросы в окружающую среду. Длительность использования, как правило, зависит от стабильности никелевых комплексов. Применение лигандов, образующих слабые комплексы с никелем, например ацетата, позволяет лишь краткосрочно использовать растворы. Только часть никеля используется для осаждения покрытий из таких растворов, а основная часть попадает в стоки. Лиганды, образующие стабильные комплексы с никелем, например цитрат, аминокислотная кислота (глицин), обеспечивают корректируемость растворов и долговременное их использование [7, 8]. Однако присутствие лигандов в растворах химического никелирования препятствует удалению металлов из отработанных растворов, особенно в виде их нерастворимых гидроксидов, которые широко применяют для обезвреживания гальваносток.

Возможность удалять металлы из их комплексов при обезвреживании растворов зависит не только от стабильности комплексного соединения, но и от природы лиганда [9]. Поэтому при использовании цитрата в качестве лиганда для Ni(II) появляется возможность обезвредить отработанные растворы химического никелирования при помощи гидроксидов и избытка Fe(III) или регенерировать их в случае применения избытка Ni(II) как осадителя.

Основным недостатком цитратных растворов химического никелирования является малая скорость осаждения покрытий. Данная работа проводилась с целью создания регенерируемого раствора химического никелирования, обеспечивающего достаточно высокую скорость осаждения покрытий. Покрытия, обладающие определенными свойствами, были получены путем подбора концентраций основных компонентов раствора и введением добавок.

Как видно из рис. 1, при увеличении концентрации цитрата выше 0,1 моль/л светопоглощение больше не меняется. Это показывает, что в слабокислой среде при образовании цитратного комплекса для 0,1 моля никеля необходимо 0,1 моля цитрата. Однако скорость осаждения никелевого покрытия с помощью гипофосфита в таком растворе недостаточно высокая. С целью ее увеличения были испытаны добавки борной кислоты и ряда органичес-

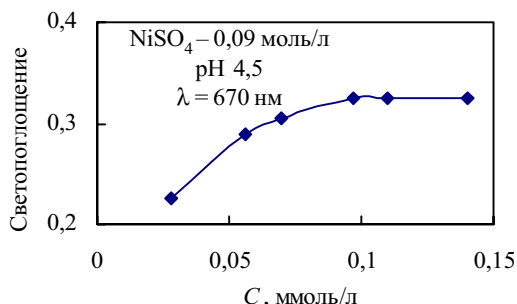


Рис. 1. Изменение светопоглощения с увеличением концентрации цитрата (C) при образовании Ni(II)-цитратного комплекса

ких кислот: малоновой, янтарной, яблочной и адипиновой. Добавление оптимального количества ускорителя увеличивает скорость осаждения никелевых покрытий на 15 — 20%. Для стабилизации раствора никелирования, т. е. для предупреждения образования никелевых частиц в объеме раствора, были выбраны ионы Cu(II) (0,2 — 0,5 ммоль/л, в зависимости от pH раствора). Медь не является катализатором осаждения гипофосфита, и ионы Cu(II) не могут быть им восстановлены, однако медь осаждается на активные центры никеля по реакции обмена и обеспечивает надежную стабильность раствора никелирования, а также селективность осаждения никеля в случае нанесения покрытия на основу из смешанных материалов [10, 11].

Скорость осаждения никеля из цитратного раствора увеличивается с увеличением pH, как и при никелировании из других растворов (рис. 2, кривые 1, 2). При pH ≥ 6 наблюдается некоторая нестабильность раствора, поэтому предложенный раствор рекомендуется для никелирования в слабокислой среде.

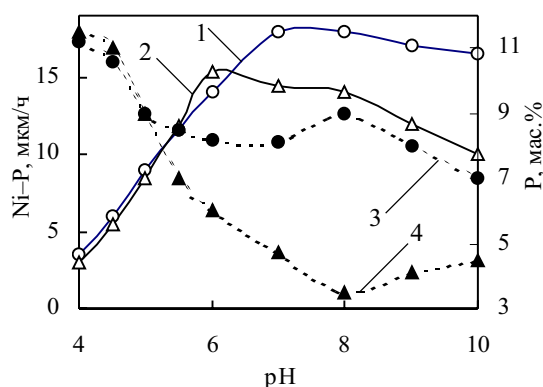
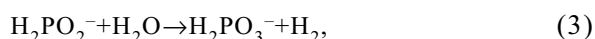
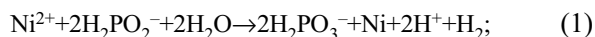


Рис. 2. Зависимость скорости осаждения Ni—P-покрытий при 85°C (1, 2) и содержания в них фосфора (3, 4) от pH цитратного (1, 3) и глицинового (2, 4) растворов

Методом масс-спектрометрического исследования изотопного состава выделившегося водорода установлено, что в слабокислой среде (до pH=5) процесс никелирования протекает по схеме



а при pH > 5 на осаждение 1 моля фосфора расходуются 2 моля гипофосфита [12]. Как показано на рис. 2, включение фосфора в покрытия, осажденные из цитратного и глицинового растворов в слабокислой среде (pH 4 — 5), приблизительно одинаковое и равняется 10 — 11%. С повышением pH глицинового раствора наблюдается резкое снижение содержания фосфора в покрытии, в то время как при осаждении никеля из цитратного раствора количество фосфора в покрытии меньше зависит от pH (рис. 2, кривые 3, 4). Наблюдаемая разница связана с различными буферными свойствами растворов и может меняться при изменении концентраций Ni(II) и лиганда. С уменьшением буферной емкости растворов никелирования меняется соотношение скоростей реакций (1) — (3) — скорость реакции восстановления Ni(II) (1) увеличивается, а реакции диспропорционирования гипофосфита с образованием фосфора (2) — уменьшается.

Количество Cu, включенного в покрытия, колеблется в пределах 1—2 мас.% в зависимости от pH раствора и концентрации Cu(II) ионов. Осаждение меди на активных центрах имеет не только стабилизирующее, но и микровыравнивающее, блескообразующее действие. Как и в глициновом растворе никелирования [10], присутствие Cu(II) в цитратном растворе уменьшает так называемый “неполезный расход” гипофосфита в реакции (3). Об этом свидетельствуют данные таблицы, полученные при восстановлении до 10% начального Ni(II) из растворов с различными pH. Повышение концентрации Cu(II) с увеличением pH раствора обеспечивает его стабильность и уменьшает расход гипофосфита в реакции (3).

Расход гипофосфита при осаждении никелевых покрытий из 50 мл раствора

pH	[Cu ²⁺], ммоль/л	Содержание, мас. %		Израсходовано NaH ₂ PO ₂ , ммоль, на осаждение					
		P	Cu	всего	Ni	P	Cu	в реакции (3)	в реакции (3) на 1 г Ni—P
4	—	10,1	—	1,5	0,8	0,34	—	0,36	14
4	0,2	11,2	1,5	1	0,56	0,27	0,008	0,16	9
4,5	—	10,9	—	0,95	0,44	0,21	—	0,3	20
4,5	0,2	10,6	1,1	1,15	0,66	0,3	0,008	0,18	8
5	0,2	9,7	1,3	1,25	0,68	0,28	0,009	0,27	12
5	0,4	8,9	1,6	1,4	0,84	0,32	0,014	0,23	8
6	0,2	7,2	0,6	1,9	0,88	0,13	0,005	0,88	32
6	0,4	8,3	1,5	1,25	0,78	0,13	0,012	0,33	13
7	0,4	8,1	1,7	1,25	0,65	0,11	0,011	0,48	23
8	0,4	9,4	1,1	0,95	0,65	0,13	0,007	0,16	8
10	0,4	7	1,2	1,15	0,44	0,06	0,005	0,64	45

На рис. 3 приведены данные длительного использования слабкислого цитратного раствора при его постоянном корректировании после восстановления в каждом опыте не более чем 10% Ni(II), т. е. после осаждения около 0,4 г Ni—P из 1 л раствора. Усредненные данные показывают некоторое снижение скорости осаждения покрытий (кривая 1). Это может быть связано с изменением буферных свойств раствора из-за накопления в нем фосфита (кривая 2), а также и цитрата (при осаждении 1 г Ni—P в раствор

вводилось 0,5 г цитрата натрия). При корректировании растворов вместе с фосфитом в растворе накапливаются и сульфаты, вводимые вместе с Ni(II). Накапливание сульфата в растворе никелирования (кривая 3) происходит медленнее, чем фосфита (при накоплении 1 моля фосфита в раствор дополнительно вводится около 0,3 моля сульфата). Такой раствор остается стабильным, и скорость осаждения покрытий в нем мало меняется. Однако с увеличением концентраций сульфата и фосфита увеличивается вязкость раствора и ухудшаются свойства покрытий.

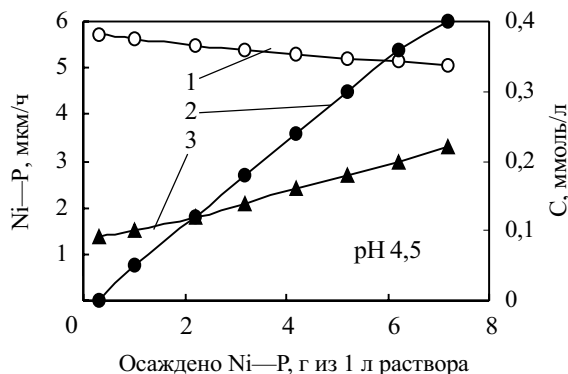


Рис. 3. Зависимость скорости осаждения покрытий (1) и накопления в растворе фосфита (2) и сульфата (3) от количества осажденного никеля при корректировании раствора после осаждения каждые 0,3–0,4 г Ni—P из 1 л

Нами установлено, что при добавлении 1 моля фосфита в свежий раствор никелирования наводороживание покрытий увеличивается в 7–8 раз, а при присутствии в растворе еще и 0,35 моль/л сульфата – более чем в 10 раз. Число пор и внутренние напряжения никеля увеличиваются в 3–5 раз [13].

Таким образом, с целью осаждения Ni—P-покрытий со стабильными свойствами рекомендуется часть раствора заменить свежим при накоплении не более 0,4 моль/л фосфита, а использованный – регенерировать. Такое периодическое обновление позволяет избежать роста концентраций фосфита и сульфата в растворе.

Удаление никеля из цитратных или глициновых комплексов в виде его гидроксидов, которые широко применяют для обезвреживания гальваносток, практически невозможно ввиду их высокой устойчивости. Однако присутствие избытка ионов металла значительно меняет поведение этих лигандов. В щелочной среде (см. рис. 4, а, б) с увеличением концентрации металла в цитратных растворах осаждается как никель, так и цитрат, в то время как увеличение концентрации металла в глициновом растворе лишь незначительно снижает концентрацию никеля и лиганда. Такое свойство цитрата позволяет удалить его из растворов путем осаждения вместе с Ni(II). В случае применения Ni(II) в качестве осадителя образовавшееся комплексное никель-цитратное соединение можно повторно использовать для составления раствора химического никелирования или для его последующей регенерации.

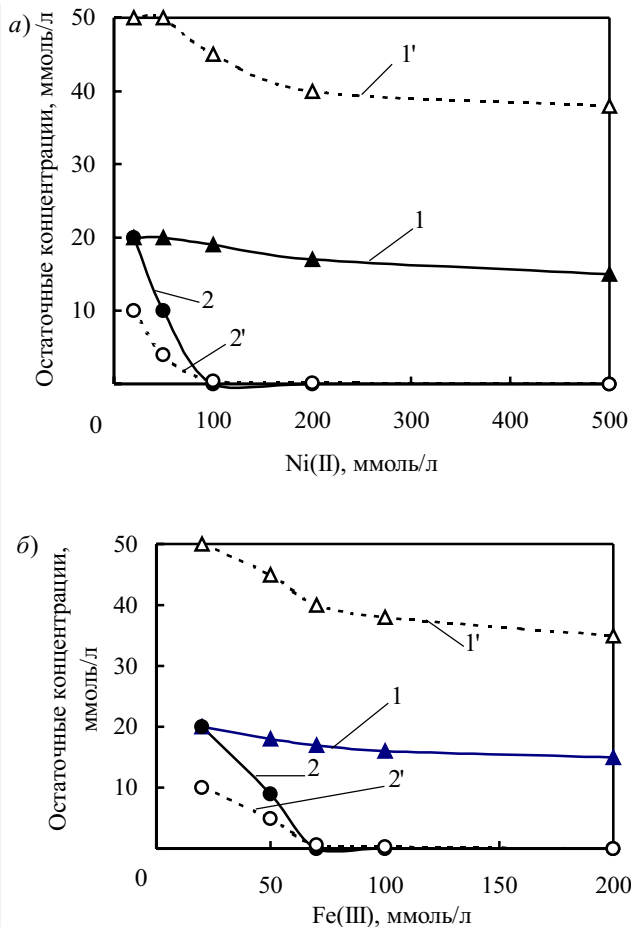


Рис. 4. Влияние концентрации Ni(II) (а) при pH=12 и Fe(III) (б) при pH=8 на осаждение Ni(II) (1, 2) и лиганда (1', 2') в глициновом (1, 1') и в цитратном (2, 2') растворах. Начальные концентрации, ммоль/л: Ni(II) – 20, глицина – 50, цитрата – 20

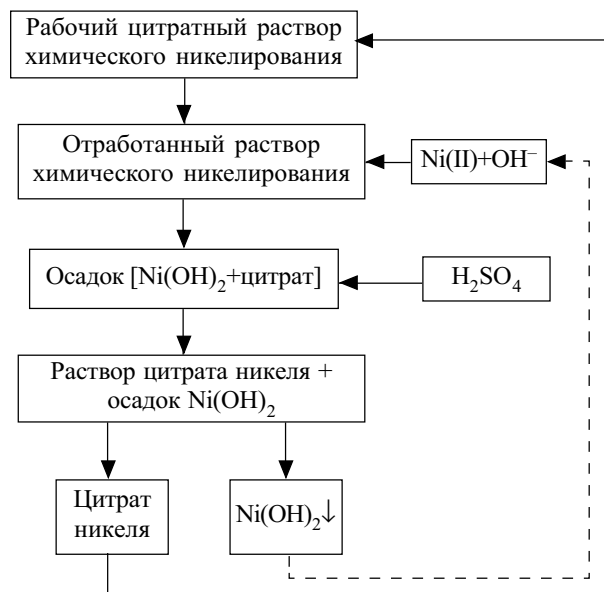


Рис. 5. Схема регенерации отработанного цитратного раствора химического никелирования

Регенерацию отработанных цитратных растворов химического никелирования проводили (рис. 5) путем добавления избытка раствора сульфата никеля и раствора щелочи до pH 11–12. После отделения осадка путем фильтрования определяли остаточные концентрации ионов никеля и цитрата в фильтрате. Полученный осадок никель-цитратного комплекса обрабатывали разбавленной H_2SO_4 . При этом образовавшийся раствор цитрата никеля отделяли от нерастворимого $Ni(OH)_2$ путем фильтрования. Раствор цитрата никеля использовали для составления свежей порции раствора химического никелирования, а осадок $Ni(OH)_2$ — для корректирования рабочего раствора или для регенерации отработанного раствора.

Регенерированный таким образом раствор своими свойствами ничем не отличается от свежеприготовленного раствора. Необходимо отметить, что вместе с цитратом соосаждаются и ускоряющие добавки, т. е. они регенерируются или обезвреживаются вместе с цитратом.

При обезвреживании отработанных растворов химического никелирования в качестве осадителя цитрата можно использовать избыток ионов $Fe(III)$.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Lo P. H., Tsai W.-T., Lee J.-T., Hung M.-P. Role of the phosphorus in the electrochemical behaviour of electroless Ni—P alloys in 3.5% NaCl solutions // Surface and Coatings Technology.— 1994.— Vol. 67, N 1—2.— P. 27—34.
2. Hur K.-H., Jeong J.-H., Lee D. N. Microstructure and crystallization of electroless Ni—P deposits // J. Material Science.— 1990.— Vol. 25, N 5.— P. 2573—2584.
3. Balaraju J. N., Seshadri S. K. Synthesis and characterization of electroless nickel-high phosphorus coatings // Metal Finishing.— 1999.— Vol. 97, N 7.— P. 8—10.
4. Das L., Chin D.-T., Zeller R. L. Effect of microstructure of ferrous substrate on porosity of electroless nickel coating // Plating and Surface Finishing.— 1995.— Vol. 82, N 10.— P. 56—60.
5. Iacovangelo C. D. Continuous in-situ regeneration of electroless nickel baths during powder plating // Ibid.— 1995.— Vol. 82, N 9.— P. 77—82.
6. Соцкая Н. В., Аристов И. В., Гончарова Л. Г., Кравченко Г. А. Математическое моделирование химического осаждения никеля гипофосфитом натрия // Журнал прикладной химии.— 1997.— Т. 70, вып. 3.— С. 427—429.
7. Гянумене И., Лянкайтене Ю., Тарозайте Р. Осаждение пластичных никелевых покрытий с регенерацией раствора // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 1992.— № 2.— С. 59—60.
8. Гилене О., Чяпенене Д. Осаждение никель-фосфорных покрытий из растворов химического никелирования // Защита металлов.— 1988.— Т. 24.— С. 845—849.
9. Gylienė O., Šalkauskas M., Juškenas R. The use of organic acids as precipitants for metal recovery from galvanic solutions // J. Chemical Technology and Biotechnology.— 1997.— Vol. 70, N 1.— P. 111—115.
10. Тарозайте Р. К., Луныцкас А. М. Влияние $Cu(II)$ при осаждении Ni гипофосфитом // Тр. АН ЛитССР. Серия Б.— 1986.— Т. 4.— С. 3—8.
11. Armyanov S., Georgieva J., Tachev D. et al. Electroless deposition of Ni—Cu—P alloys in acidic solutions // Electrochem. Solid-State Letters.— 1999.— Vol. 2.— P. 323—325.
12. Юсис З. 3., Ляуконис Ю. Ю. Стехиометрия реакции образования фосфора при восстановлении никеля (II) гипофосфитом // Журнал неорганической химии.— 1989.— Т. 34, вып. 2.— С. 337—341.
13. Tarozaitė R., Genutienė I., Lenkaitienė J. Influence of phosphite and sulphate ions on nickel coating deposition by hypophosphite // Abstracts 2nd National Lithuanian Conference “Chemistry 95”.— 1995.— Vilnius.— P. 35—36.

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

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

➤ Модернизация установки фотонного отжига полупроводниковых пластин "Оникс". Г. В. Савицкий, А. Ю. Бончик, И. И. Ижнин, С. Г. Кияк, И. А. Могилык, И. П. Тростянский (Украина, г. Львов)

➤ Высококачественные вещества для микроэлектроники. В. М. Ажажа, Г. П. Ковтун, И. М. Неклюдов (Украина, г. Харьков)

➤ Кристаллизация полых кремниевых призм методом Степанова для фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии. Б. П. Масенко (Украина, г. Херсон)

➤ Анизотропный термоэлемент в режиме генерации электроэнергии. А. А. Ащеулов, В. Г. Охрем, Е. А. Охрем (Украина, г. Черновцы)

➤ Использование низкоразмерных гетероструктур соединений A^3B^5 в датчиках давления. И. Е. Марончук, А. Д. Кучерук, С. Ю. Ерохин, И. В. Чорный (Украина, г. Херсон)

➤ Охлаждение перспективных винчестеров с применением тепловых труб. Ю. Е. Николаенко, В. Ю. Кравец, В. А. Стрюченко, С. А. Белоконенко (Украина, г. Киев)

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

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



К. т. н. О. Н. НЕГОДЕНКО, С. А. ЧЕРЕВКО

Россия, Таганрогский гос. радиотехнический университет
E-mail: metbis@fep.tsure.ru

Дата поступления в редакцию
08.02.2002 г.

Оппонент к. т. н. В. С. ГОЛУБ
(НПФ "VD MAIS", г. Киев)

ПЛАНАРНЫЕ ВЗАИМОИНДУКТИВНЫЕ СЕНСОРЫ ДЛЯ ДАТЧИКОВ ПОЛОЖЕНИЯ И ПРИБЛИЖЕНИЯ

Предварительная разбалансировка индуктивного балансного сенсора открывает новые возможности в использовании планарных катушек индуктивности.

Принцип действия выпускаемых промышленностью индуктивных датчиков приближения, широко используемых в устройствах автоматики, основан на уменьшении (или срыве) амплитуды колебаний генератора с колебательным контуром за счет внесения в него затухания от приближающейся металлической пластины. К добротности и температурной стабильности используемой катушки индуктивности предъявляются высокие требования, номинальное расстояние переключения между датчиком и металлической пластиной составляет 30—50% от диаметра катушки.

В 2—3 раза увеличить расстояние переключения позволяет использование индуктивного балансного сенсора (ИБС) [1] в качестве чувствительного элемента. Такой сенсор состоит из двух планарных катушек. Если он сбалансирован путем установления определенного расстояния между катушками, то при подаче гармонического сигнала на входную (первую) катушку сигнал на клеммах выходной (второй) катушки отсутствует. Приближение металлической пластины к ИБС ведет к росту выходного сигнала.

Катушки ИБС могут изготавливаться групповым методом по технологии интегральных микросхем и печатных плат, они дешевые и стабильные. С целью сохранения уже разработанной и применяемой электронной части выпускаемых промышленностью датчиков приближения при использовании дешевых планарных катушек необходимо изменить характер поведения выходного напряжения ИБС по мере приближения металлической пластины (выходное напряжение должно уменьшаться). Оказалось, что этого удастся достичь, если ИБС предварительно разбалансировать. Особенности характеристик разбалансированных ИБС, которые можно назвать взаимноиндуктивными сенсорами, пока не изучены.

В настоящей работе характеристики разбалансированных ИБС исследовались экспериментально. На вход ИБС подавался синусоидальный сигнал с амплитудой $U_m = 2$ В и частотой $f = 500$ кГц от генератора, а

выходная катушка подключалась к осциллографу. Для исключения резонансных явлений катушки ИБС шунтировались резисторами с сопротивлением 1,2 кОм. Катушки изготавливались из провода ПЭВ-0,2 с числом витков $N = 20$, причем размеры площади поперечного сечения всех проводов составляли менее 5% от других размеров катушек.

В эксперименте использовались катушки прямоугольной, кольцевой и треугольной формы. Высота прямоугольника $h = 134$ мм, его основание $a = 47$ мм, диаметры кольцевых катушек D равны 67 и 107 мм. Размер стороны катушки в виде равностороннего треугольника $b = 116$ мм. Частота $f = 500$ кГц выбрана из условия обеспечения высокой чувствительности ИБС, представляемой как отношение приращения амплитуды выходного напряжения $U_{m \text{ вых}}$ к приращению расстояния l между ИБС и параллельной ему металлической пластиной с площадью, существенно превышающей площадь ИБС. Экспериментально выявлено, что при оговоренных выше размерах катушек высокая чувствительность наблюдается при частотах 0,5 — 2 МГц. При более низких частотах уменьшается область распространения электромагнитного поля, а при более высоких частотах сказывается шунтирующее действие собственной емкости катушек.

(Размеры катушек выбраны произвольно из условия удобства работы с ними. При других размерах катушек меняются частоты, соответствующие высокой чувствительности сенсоров, и амплитуда входного напряжения, но выявленные закономерности сохраняются.)

Исследуемые варианты ИБС показаны на **рис. 1** (катушки условно показаны одновитковыми). Если ИБС были сбалансированы, то выходное напряжение увеличивалось по мере приближения к ИБС медной пластины, что показано на **рис. 2** (кривые 6—10). Степень разбалансировки ИБС влияла на характер изменения выходного напряжения при приближении к ИБС медной пластины. Если ИБС разбалансирован путем раздвижения катушек относительно состояния балансировки (уменьшен размер c), то при приближении медной пластины уже увеличившееся выходное напряжение продолжает увеличиваться, или сначала увеличивается, а затем уменьшается. Если ИБС разбалансирован путем сближения катушек (увеличен размер c), то уже увеличившееся выходное напряжение при приближении медной пластины сначала

Работа выполнена при поддержке совместного гранта Минобрзаования РФ и Американского фонда гражданских исследований и развития № REC-004.

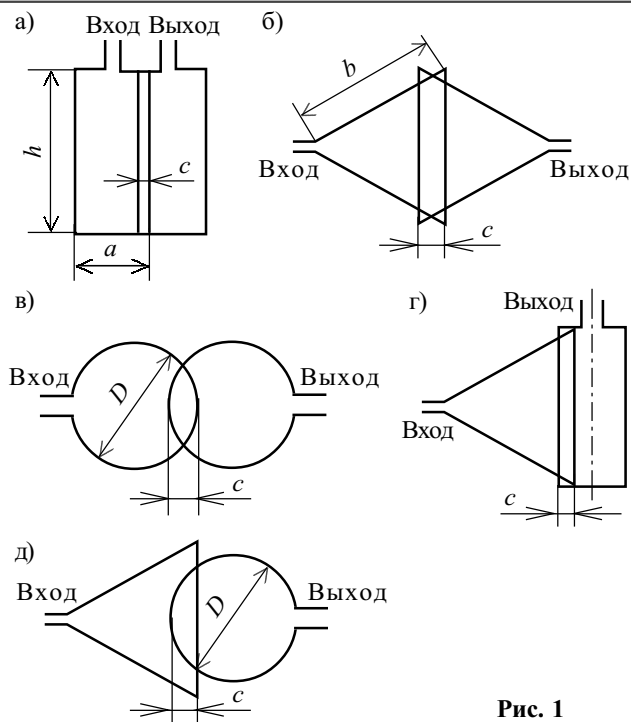


Рис. 1

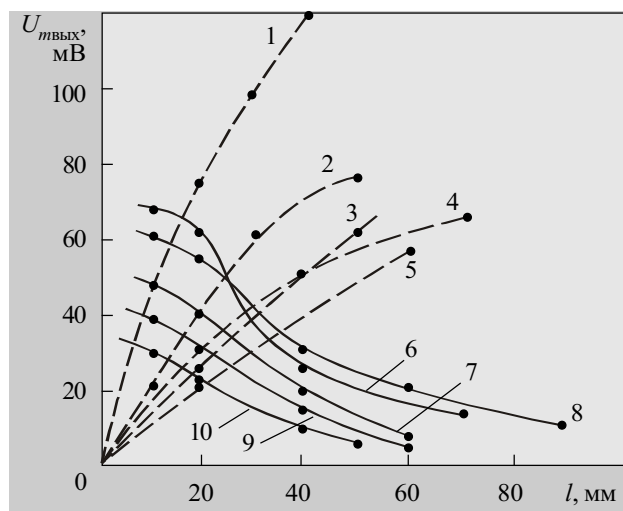


Рис. 2

— — баланс; - - - - разбаланс

a—д — варианты ИБС по рис. 1:

1 ($c=16$ мм), 9 ($c=10$ мм) — вариант б; 2 ($c=30$ мм), 8 ($c=15$ мм) — вариант д; 3 ($c=15$ мм), 10 ($c=10$ мм) — вариант г; 4 ($c=12$ мм), 6 ($c=8$ мм) — вариант а; 5 ($c=20$ мм), 7 ($c=15$ мм) — вариант в

ла уменьшается до нуля, а затем увеличивается, причем изменением расстояния c можно получить нулевое значение выходного напряжения при любом расстоянии между ИБС и медной пластиной в пределах зоны чувствительности. Это явление можно использовать в датчиках положения для фиксации прохождения медной пластиной определенного положения, в котором датчик выключается, а затем опять включается при дальнейшем движении пластины. Можно установить такое расстояние c , при котором нулевое выходное напряжение ИБС будет соответствовать нулевому расстоянию l , что показано на рис. 2 (кривые 1—5).

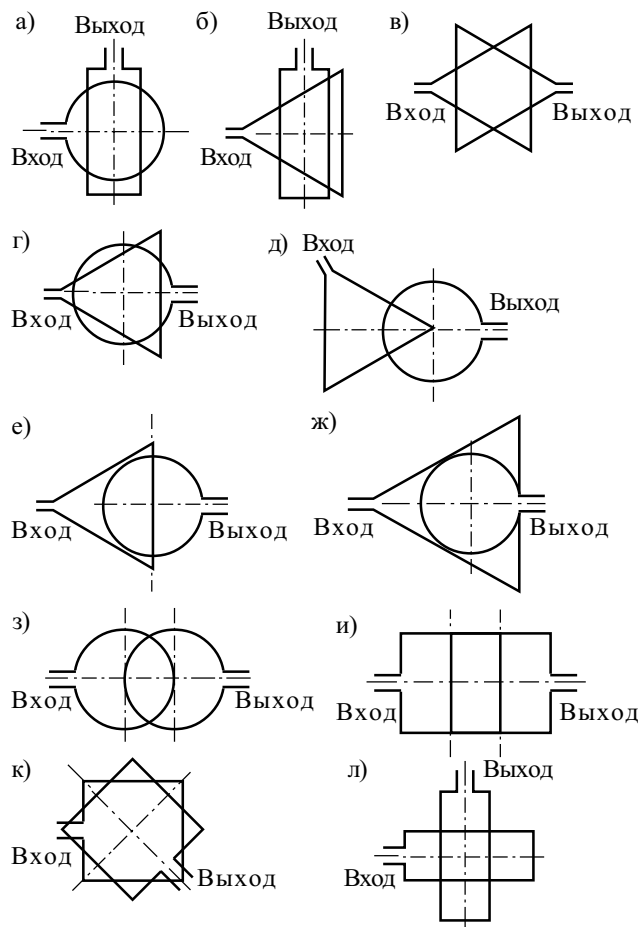


Рис. 3

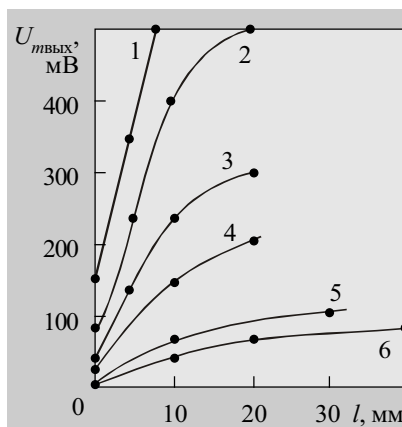


Рис. 4

a—л — варианты ИБС по рис. 3:

1 — з, к; 2 — в, е, ж, и; 3 — а; 4 — г; 5 — б; 6 — д, л

Уменьшение выходного напряжения при приближении металлической пластины связано с уменьшением мощности, идущей на создание электромагнитного поля (увеличивается вносимое активное сопротивление во входную катушку), экранированием катушек. Сравнивая кривые рис. 2, можно заметить, что чувствительность ИБС при сбалансированном состоянии составляет 0,5—1,5 мВ/мм, а при разбалансированном состоянии — 1—3,75 мВ/мм, т. е. в последнем случае она в несколько раз выше. При этом зона чувствительности для разбалансированного ИБС уменьшается в 2—3 раза по сравнению с зоной чувствительности сбалансированных ИБС.

На рис. 3 приведены конфигурации катушек и их расположение для разбалансированных ИБС как бы классической формы, когда не нужно подбирать расстояние s между катушками. Графики зависимости выходного напряжения таких ИБС от расстояния между ИБС и медной пластиной показаны на рис. 4. Видно, что зона чувствительности здесь также сокращена в два и более раз, некоторые ИБС позволяют получить нулевое выходное напряжение при нулевом расстоянии между ИБС и медной пластиной (δ , δ , δ), у других ИБС оно не нулевое (δ , δ , δ , δ , δ , δ , δ), выходное напряжение более высокое, чем для ИБС, приведенных на рис. 1. Это дает чувствительность в пределах 4 — 4,5 мВ/мм, т. е. она в десятки раз выше, чем у сбалансированных ИБС. Такая же закономерность наблюдалась еще у 12 не приводимых в статье конфигураций планарных сенсоров.

Замечено также, что если катушки расположить на одной медной пластине и сбалансировать ИБС, то при приближении второй медной пластины к ИБС выходное напряжение сохраняет свое нулевое значение. Иначе ведет себя взаимноиндуктивный небалансире-

мый сенсор, расположенный на одной медной пластине: при приближении к сенсору другой медной пластины выходное напряжение уменьшается из-за улучшения экранирования катушек, внесения в первую катушку дополнительного активного сопротивления. При этом зона чувствительности невелика — она не превышает 10% от максимального размера ИБС. Это позволяет создавать датчики приближения, прикрепляемые на металлическую поверхность, что часто необходимо.

Рассмотренные взаимноиндуктивные небалансируемые сенсоры просты в проектировании при изготовлении их по технологии печатных плат, пленочных или полупроводниковых интегральных микросхем.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Негоденко О. Н., Семенцов В. И., Мардамшин Ю. П. Датчики приближения и положения на основе индуктивных балансных сенсоров // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2001. — № 4—5. — С. 53 — 55.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ. СИМПОЗИУМЫ

9—13 сентября 2002 г. в г. Севастополе состоялась 12-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». На четырех пленарных и 24 секционных заседаниях было заслушано свыше 200 докладов по теоретическим, экспериментальным, производственно-технологическим, прикладным аспектам СВЧ-техники и телекоммуникационных технологий. В рамках конференции были проведен семинар «Мультисервисные сети широкополосного доступа» и «Применение СВЧ-техники в медицине и экологии». В работе конференции приняли участие около 180 ученых и специалистов из Бахрейна, Беларуси, Казахстана, Молдовы, Нидерландов, Португалии, Российской Федерации и Украины. Конференция была проведена на базе Черноморского филиала Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Севастопольского национального технического университета и Морского гидрофизического института НАН Украины.

Организаторами и спонсорами конференции выступили: ФГУП НПО «Орион» (Москва), ФГУП «ЦНИРТИ» (Москва), Компания «Укрспецэкспорт» (Киев), ОАО «Сатурн» (Киев), Interface Co. (Москва), ГНПП «Исток» (Фрязино), НИИ телекоммуникаций НТУУ «КПИ» (Киев), НИИ «Орион» (Киев), НИИ радиоматериалов (Минск), Черноморский филиал МГУ им. М. В. Ломоносова (Севастополь), Севастопольский национальный технический университет, Морской гидрофизический институт НАН Украины (Севастополь), Государственный испытательный центр «Омега» (Севастополь), Национальный центр управления и испытаний космических средств (Евпатория), Отдел радиоастрономии Крымской астрофизической обсерватории (Кацивели), предприятие «Вебер» (Севастополь). Техническими спонсорами конференции выступили: Таганрогский радиотехнический университет, IEEE ED Society, IEEE MTT/ED/ComSoc Central Chapter, Ukraine Section, IEEE AP Chapter, Russia Section, журнал «Технология и конструирование в электронной аппаратуре» (Одесса), журнал «Наукові вісті НТУУ КПІ» (Киев).

Конференция отметила, что важным фактором повышения качества разработок является углубление интеграции деятельности исследовательских и производственных коллективов Российской Федерации и Беларуси, а также начало аналогичных процессов в отношениях между предприятиями Российской Федерации и Украины.

13-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» пройдет 8—12 сентября 2003 года в г. Севастополе.

К. т. н. П. П. ЕРМОЛОВ

E-mail: weber@execs.com

КрыМиКо
2003
Crimico

К. ф.-м. н. В. А. ВАСИЛЬЕВ

Россия, Пензенский государственный университет
E-mail: paspen@rambler.ru

Дата поступления в редакцию
04.06 2002 г.

Оппонент к. т. н. Е. В. БОНДАРЕНКО
(НИИ "Шторм", г. Одесса)

МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

Классифицированы и рассмотрены методы уменьшения температурной погрешности, приведены примеры реализации методов в конструкциях датчиков давления.

Прямым назначением датчиков давления является регистрация измеряемой величины. Однако в большинстве случаев, наряду с полезным информативным сигналом измеряемой величины, на чувствительный элемент датчика (первичного преобразователя) действует неинформативный сигнал (сигнал помехи). Выделение полезного информативного сигнала не всегда бывает простой задачей, и решать ее приходится различными путями [1,2].

К числу наиболее часто встречающихся факторов, вызывающих появление неинформативного сигнала, относится температура. Целью настоящей статьи является получение рекомендаций по рациональному проектированию датчиков давления с учетом анализа их температурных погрешностей.

Различают квазистатическое и динамическое воздействие температуры [1]. Динамическое воздействие чаще всего оказывается со стороны измеряемой среды. Со стороны окружающей среды обычно имеет место квазистатическое воздействие температуры (медленно меняющееся со временем). Величиной, характеризующей влияние температуры на выходной сигнал первичных преобразователей, служит температурная погрешность.

Температурные погрешности датчиков давления обусловлены многими физическими процессами, протекающими в них при тепловом воздействии. Наиболее общими причинами возникновения температурных погрешностей являются изменение сопротивления, изменение коэффициента чувствительности, изменение модуля упругости, изменение линейных размеров [2]. Однако в каждом отдельном случае необходимо анализировать все виды причин. Например, при разработке датчиков давления для двигателей внутреннего сгорания и баллистических установок нельзя оставлять без внимания такие явления как температурная деформация и появление градиента температуры, которые могут служить причиной возникновения значительной температурной погрешности.

В последние десятилетия для точных измерений давлений достаточно широкое применение получили

тензорезисторные преобразователи на основе металлопленочных тензорезисторов, что позволило создать новый класс датчиков — металлопленочные интегральные датчики. Однако существующие металлопленочные датчики давления обладают рядом недостатков, которые сдерживают их применение в мощных энергетических установках. К таким недостаткам следует отнести высокую температурную погрешность при работе в условиях действия нестационарных температур (термоудара), значительную температурную погрешность нуля и чувствительности.

Можно выделить три основных группы методов уменьшения температурной погрешности — конструктивную, схемную и конструктивно-схемную.

Конструктивные методы. Одной из существенных причин возникновения температурной погрешности первичных преобразователей, построенных на основе металлопленочных тензорезисторов, является наличие градиента температуры в элементах конструкции датчика. Особенно сильное действие градиента температуры проявляется в выходном сигнале датчика из-за воздействия на его чувствительный элемент.

Эффективным методом уменьшения температурных погрешностей, обусловленных градиентом температуры, является создание равенства усредненных температур для чувствительных элементов первичных преобразователей. Данный метод применен в датчике для измерения давления [3], конструкция которого представлена на рис. 1. Датчик содержит мембрану с тензорезисторами, сформированными по металлопленочной технологии (см. рис. 1, а) и объединенными в мостовую измерительную цепь (рис. 1, б).

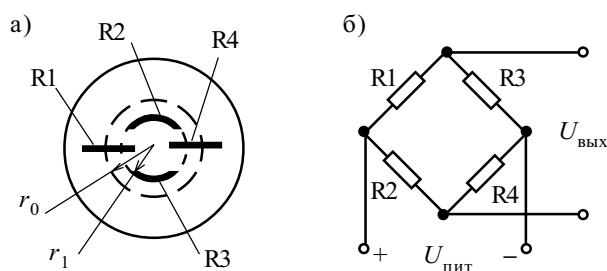


Рис. 1. Датчик измерения давления с равной усредненной температурой чувствительных элементов:

а — расположение тензорезисторов на мембране; б — мостовая измерительная цепь

Снижение влияния термоудара на выходной сигнал датчика достигается путем определенного размещения тензорезисторов на мембране. Тензорезисторы R2 и R3, расположенные в окружном направлении, установлены по окружности, радиус которой равен

$$r = r_0 - \frac{1}{3}l_{\text{тр}}, \quad (1)$$

где r_0 — расстояние от центра мембраны до середины радиальных тензорезисторов R1 и R4;

$l_{\text{тр}}$ — длина радиального тензорезистора.

При действии термоудара, например, температуры $T = -196^\circ\text{C}$ (жидкий азот) температура на поверхности воспринимающей мембраны распределяется неравномерно, как показано на **рис. 2** (экспериментальные данные, r_m — текущий радиус мембраны). Из рисунка видно, что значение температуры, соответствующее среднему значению температуры краев радиальных тензорезисторов R1 и R4, находится на расстоянии r от центра мембраны и соответствует выражению (1). Изменение сопротивлений тензорезисторов R2 и R3 (окружных) под действием термоудара равно изменению сопротивлений тензорезисторов R1 и R4 (радиальных). А поскольку тензорезисторы R1, R2, R3 и R4 образуют плечи моста, то сигнал на выходе измерительной цепи не изменяется при воздействии термоудара. Температурная погрешность становится практически равной нулю.

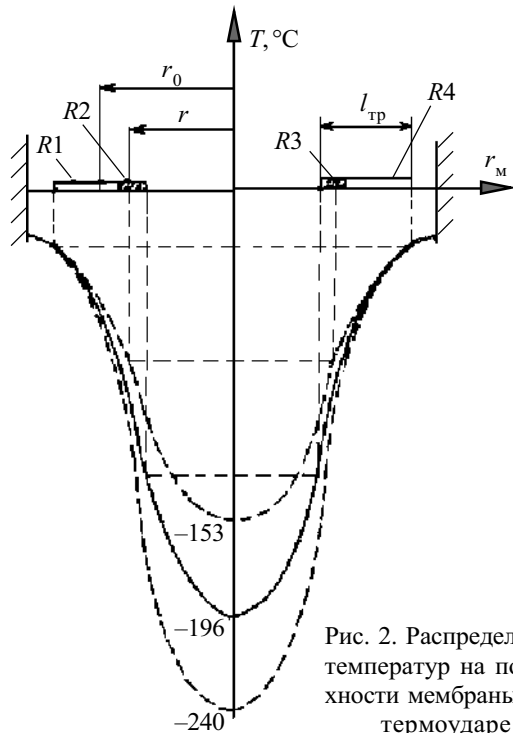


Рис. 2. Распределение температур на поверхности мембраны при термоударе

Аддитивная температурная чувствительность датчика давления, характеризующая температурную погрешность, определяется выражением

$$S_{0T} = \frac{(\alpha_1 + \alpha_4) - (\alpha_2 + \alpha_3)}{\sum_{i=1}^4 \varepsilon_{Ri}}, \quad (2)$$

где $\alpha_1, \dots, \alpha_4$ — температурные коэффициенты сопротивления тензорезисторов R1, R2, R3, R4 (соответственно) с учетом температурного поля;

$\sum_{i=1}^4 \varepsilon_{Ri}$ — относительное изменение сопротивления всех плеч мостовой цепи от номинального давления.

Для рассмотренной конструкции датчика давления $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4$, поэтому из выражения (2) следует, что $S_{0T} = 0$.

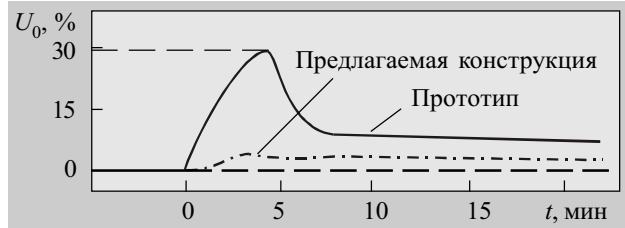


Рис. 3. Изменение начального выходного сигнала датчика давления со временем в сравнении с прототипом

На **рис. 3** представлены графики изменения начального выходного сигнала датчика давления в сравнении с прототипом при воздействии на приемную полость жидкого азота (термоудар). Из рисунка видно, что скачкообразное изменение начального выходного сигнала (а следовательно, и величина погрешности) в предлагаемой конструкции практически отсутствует, а температурная погрешность не превышает погрешности в стационарном температурном режиме. Метод создания равенства усредненных температур применен в различных конструкциях датчиков давления [4 и др.].

Схемные методы уменьшения температурных погрешностей датчиков достаточно хорошо описаны в [5, с. 48—68].

В качестве примера схемного решения задачи восстановления информации о давлении и уменьшения температурной погрешности на **рис. 4** представлен датчик давления, входящий в устройство [6]. В нем чувствительные к деформации металлопленочные тензорезисторы сформированы на плоской грани стержневого упругого элемента 2. Тензорезисторы 1 и 6 испытывают продольную, а тензорезисторы 4 и 7 — поперечную деформации.

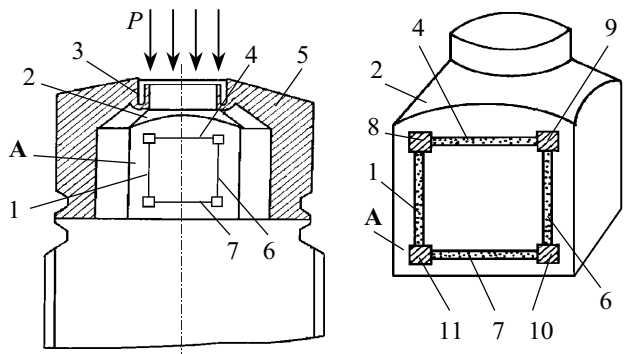


Рис. 4. Датчик давления со стержневым упругим элементом:

1, 4, 6, 7 — металлопленочные тензорезисторы; 2 — стержневой упругий элемент; 3 — мембрана; 5 — корпус датчика; 8—11 — контактные площадки

При подаче измеряемого давления (P) со стороны мембраны 3 (рис. 4) на выходе мостовой измерительной цепи из тензорезисторов 1, 4, 6, 7 появляется сигнал, пропорциональный измеряемому давлению. Этот сигнал (см. рис. 5) усиливается усилителем 12 и подается через регулирующий элемент (регулятор напряжения) 13 на выход устройства.

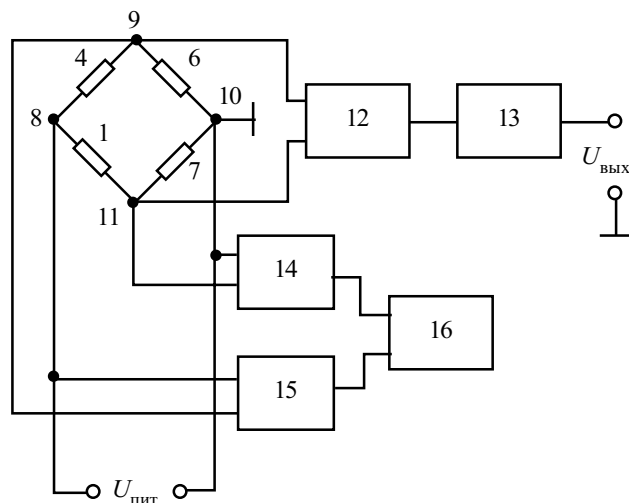


Рис. 5. Измерительная схема устройства для измерения давления:
12, 14, 15 — усилители; 13 — регулятор напряжения; 16 — сумматор

При воздействии на датчик нестационарных температур, когда имеет место градиент температуры по длине стержневого упругого элемента, тензорезисторы 4 и 7 оказываются в неодинаковых температурных условиях. В результате на выходе усилителей 14 и 15 сигналы оказываются неравными по величине, и с выхода сумматора 16 разностный сигнал, отличный от нуля, поступает на вход управления регулятора напряжения 13. Регулятор напряжения, управляемый поступающим на вход управления сигналом, обеспечивает восстановление информативного сигнала на выходе мостовой измерительной цепи, уменьшая температурную погрешность.

Конструктивно-схемные методы. В целях уменьшения температурных погрешностей датчиков давления эти методы представляют несомненный интерес.

Метод по принципу дополнительности реализован в устройстве для измерения давления [7], конструкция датчика которого представлена на рис. 6. За счет изготовленных в корпусе датчика 1 двух продольных полусферических пазов 8, выполненных с торцевой стороны, образованы каналы для охлаждающей жидкости, и мембрана охлаждается со стороны ее основания. Вместе с тем металлопленочные тензорезисторы, образующие мостовую измерительную цепь, расположены на мембране определенным образом. В частности (см. рис. 7), тензорезисторы 13 и 14 своей срединной частью размещены на двух ок-

ружностях с радиусами $r_1 = r_0 + \frac{1}{4}l_{тр}$ и $r_2 = r_0 - \frac{1}{4}l_{тр}$, соответственно. При таком расположении тензорези-

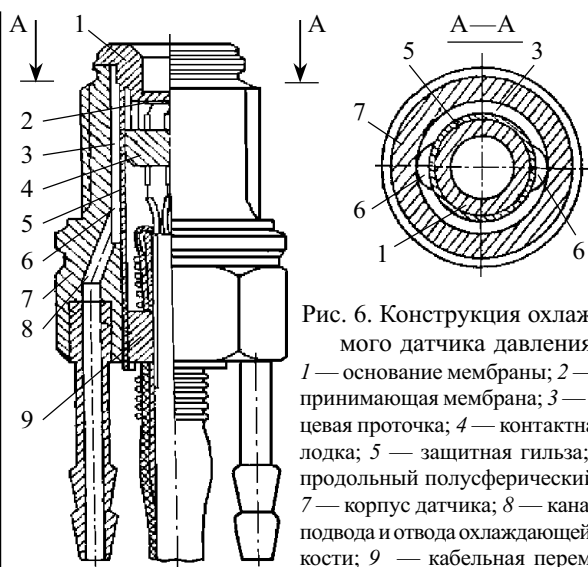


Рис. 6. Конструкция охлаждаемого датчика давления:

1 — основание мембраны; 2 — воспринимающая мембрана; 3 — кольцевая проточка; 4 — контактная колодка; 5 — защитная гильза; 6 — продольный полусферический паз; 7 — корпус датчика; 8 — канал для подвода и отвода охлаждающей жидкости; 9 — кабельная перемычка

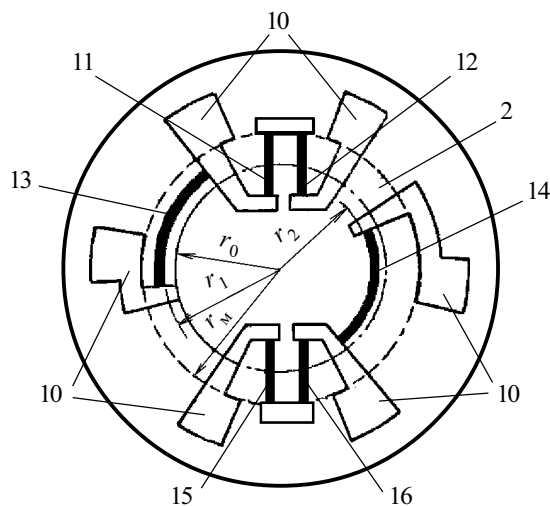


Рис. 7. Расположение тензорезисторов на мембране:
11, 12, 15, 16 — радиальные тензорезисторы; 13, 14 — окружные тензорезисторы; 10 — контактные площадки

сторов происходит компенсация температурной погрешности, вызываемой наличием градиента температуры по поверхности мембраны.

При работе датчика в условиях воздействия стационарных и нестационарных температур на выходе мостовой измерительной цепи из тензорезисторов 11—16 (см. рис. 8) будет возникать температурная погрешность, обусловленная изменением чувствительности. Однако на выходе устройства эта погрешность значительно снижена. Выходной сигнал с мостовой измерительной цепи U , содержащий составляющую температурной погрешности $\Delta U(t)$, усиливается усилителем 18 в K раз. Одновременно с полезным сигналом усиливается и составляющая температурной погрешности $\Delta U(t)$. Далее усиленный сигнал делится на напряжение U_0 в точке соединения мостовой измерительной цепи с постоянным резистором 17, который подключен к стабилизатору напряжения 19. Напряжение в этой точке пропорционально изменению чувствительности моста.

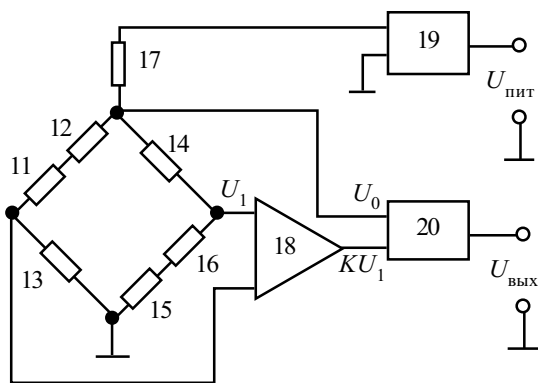


Рис. 8. Измерительная схема устройства для измерения давления:

17 — постоянный резистор; 18 — усилитель; 19 — стабилизатор напряжения; 20 — аналоговый делитель напряжения

Расчеты показывают, что

$$U_{\text{вых}} = \frac{[1 + \varepsilon_1(t)]}{[1 + \varepsilon_0(t)]} KU_1. \quad (3)$$

Из (3) видно, что относительные изменения напряжений выходного сигнала $\varepsilon_1(t)$ и напряжения в точке соединения постоянного резистора с мостовой измерительной цепью $\varepsilon_0(t)$ обратно пропорциональны, т. е. включен механизм компенсации для восстановления информации о давлении.

Особенностью рассмотренного метода является то, что конструктивные решения дополняются схемными решениями, за счет чего достигается больший положительный эффект.

Метод по принципу единого целого реализован в устройстве для измерения давления [8], где с целью уменьшения температурной погрешности на мембране сформированы терморезистивный мост и тензорезистивный мост, имеющие одинаковую топологию и размещенные друг над другом. Оба моста подключаются к общей измерительной схеме, изображенной на рис. 9. В одну из диагоналей каждого моста включен регулирующий элемент 9, а в противоположную диагональ — дифференциальный усилитель 11, с которого поступает сигнал на сумматор 12.

При действии термоудара изменяется тензочувствительность тензорезисторов 1—4, вместе с этим изменяется сопротивление терморезисторов 5—8 и, следовательно, величина сигнала, поступающего с усилителя 11 на сумматор 12. Измененный сигнал с сумматора 12, воздействуя на элемент 9, регулирует напряжение питания моста из терморезисторов таким образом, что сигнал на выходе усилителя 11 остается неизменным и равным по абсолютной величине опорному напряжению $U_{\text{оп}}$. Напряжение питания мостов изменяется обратно пропорционально изменению выходного сигнала моста из терморезисторов 5—8.

Поскольку мостовая измерительная цепь из терморезисторов размещена над мостовой измерительной цепью из тензорезисторов, закономерность изменения сигнала при воздействии термоудара с моста из терморезисторов адекватна изменению сигнала с моста из тензорезисторов. В результате этого выходной информативный сигнал усилителя 10 восста-

навливается и зависит только от изменения давления, а термоудар практически не влияет на выходную характеристику датчика. Здесь, как и в ранее рассмотренных случаях, включение механизма компенсации приводит к восстановлению информации.

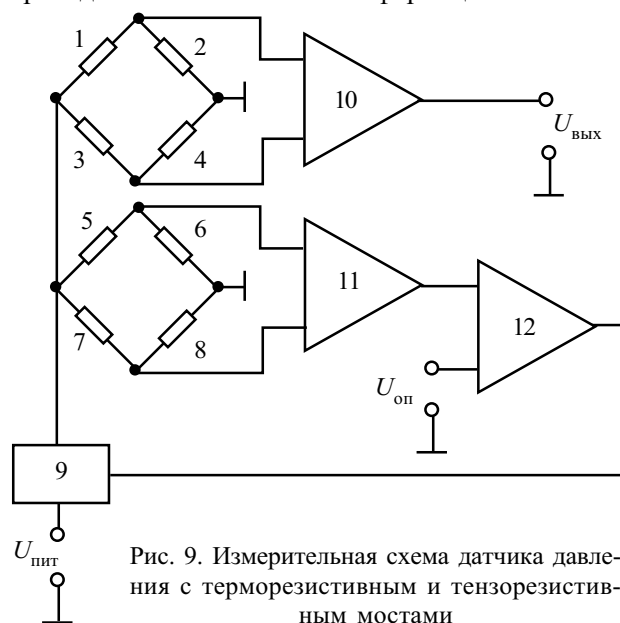


Рис. 9. Измерительная схема датчика давления с терморезистивным и тензорезистивным мостами

Тот же метод реализован и в устройствах для измерения давления с другими типами датчиков — датчиков со стержневым упругим элементом [9].

В каждом из рассмотренных вариантов технических решений задействован механизм компенсации дестабилизирующего фактора (температуры). При этом вначале устанавливается закон деградации, а затем выбирается закон изменения фактора, необходимый для компенсации [10].

Основные рекомендации, которые следует выполнять в целях уменьшения температурных погрешностей при разработке высокотемпературных и термоустойчивых датчиков давления, сводятся к следующему:

- конструкцию следует выполнять так, чтобы тепловое воздействие на элементы в цепи преобразования датчика было равномерным;
- не допускать возможности нагрева элементов конструкции датчика выше допустимой;
- стремиться использовать в электрических и контактных соединениях измерительных цепей датчика однородные металлы и сплавы, для контактных соединений — металлы и сплавы с высокой электропроводностью;
- стремиться к уменьшению числа контактных соединений из разнородных материалов;
- концентрировать элементы измерительной цепи датчика в зонах равных температур, стремиться к концентрации их в одной точке;
- выбирать материалы с температурно-независимым модулем упругости или незначительно меняющимся в рабочем интервале температур;
- применять материалы с низким температурным коэффициентом сопротивления;
- выбирать материалы сопрягаемых элементов датчика по коэффициенту теплового расширения так,

ДАТЧИКИ

чтобы при тепловом воздействии на эти элементы не возникало деформаций (необходимо, чтобы выполнялось условие обеспечения равенства абсолютных изменений линейных размеров сопрягаемых деталей);
— применять материалы и вещества с низким коэффициентом объемного расширения.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Васильев В. А. Классификация и методы уменьшения температурных погрешностей датчиков на основе твердотельных структур // Датчики и системы.— 2001.— № 12.— С. 6—7.
2. Васильев В. А. Уменьшение влияния дестабилизирующих факторов на информативный сигнал датчиков // Там же.— 2002.— № 4.— С. 12—15.
3. А. с. 1337691 СССР. Датчик давления / А. И. Тихонов, В. А. Тихоненков, А. И. Жучков, В. А. Васильев.— Оpubл. в Б. И.— 1987, № 48.
4. А. с. 1486766 СССР. Способ настройки интегральных тензометрических мостов датчиков мембранного

типа с радиальными и окружными тензорезисторами / В. А. Зиновьев, В. А. Васильев, А. И. Тихонов, В. А. Тихоненков.— Оpubл. в Б. И.— 1989, № 8.

5. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Под ред. Е. П. Осадчего.— М.: Машиностроение, 1979.

6. А. с. 1490515 СССР. Устройство для измерения давления / В. А. Васильев, А. И. Тихонов.— Оpubл. в Б. И.— 1989, № 24.

7. А. с. 1597623 СССР. Устройство для измерения давления / В. А. Васильев, А. И. Тихонов.— Оpubл. в Б. И.— 1990, № 37.

8. А. с. 1377633 СССР. Датчик давления / В. А. Васильев.— Оpubл. в Б. И.— 1988, № 8.

9. А. с. 1515081 СССР. Устройство для измерения давления / В. А. Васильев, Е. П. Осадчий, А. И. Тихонов.— Оpubл. в Б. И.— 1989, № 38.

10. Васильев В. А. Информационный ресурс регистрирующих твердотельных структур // Измерительная техника.— 2002.— № 7.— С. 22—24.

1-я УКРАИНСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФИЗИКЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

проходила с 9 по 14 сентября 2002 г. на базе Одесского национального университета им. И. И. Мечникова. Конференция с международным участием проходила под эгидой Национальной академии наук Украины, Министерства образования и науки Украины, Украинского физического общества, Института физики полупроводников НАНУ и ОНУ им. И. И. Мечникова. В конференции приняли участие более 300 представителей академических учреждений, вузов, НИИ и КБ Украины, представители университетов, научных организаций и фирм Беларуси, Венгрии, Германии, Голландии, Израиля, Молдовы, Польши, России, США, Чехии. Еще более внушительным был состав авторов докладов — представителей 29 государств.

Работа конференции проходила в следующих секциях:

1. Теоретические проблемы физики полупроводников.
2. Электронные и фононные явления в объеме и на поверхности полупроводников.
3. Наноструктуры и квантово-размерные эффекты.
4. Физика современных полупроводниковых приборов и сенсоров.
5. Полупроводниковые материалы и технологии.

Было заслушано 17 пленарных докладов, посвященных актуальным

фундаментальным и прикладным проблемам, связанным с квантово-размерными явлениями, физикой поверхности, разработкой функциональных материалов для микро- и оптоэлектроники, ИК-техники. Большой интерес вызвали проблемные доклады чл.-корр. НАНУ Литовченко В. Г. "Анализ фундаментальных параметров алмазоподобных кристаллов и низкоразмерных структур" (Киев), профессора из Нижнего Новгорода Красильника З. Ф. "Кремниевая оптоэлектроника на наноструктурах", чл.-корр. РАН Неизвестного И. Г. (Ин-т физики полупроводников СО РАН, Новосибирск) "Проблемы полупроводниковой элементной базы квантового компьютера и квантовой телепортации", чл.-корр. НАНУ Блонского И. В. (Киев) "Комбинированное влияние размерного фактора и фактора токовой неоднородности в формировании свойств излучающих структур на основе нано-Si", Ф. Коха (F. Koch) (Мюнхен) "Физика и химия нанокристаллического кремния" и С. А. Дж. Аммерлана (С. А. J. Ammerlaan) (Амстердам) "Спектроскопические характеристики редкоземельных примесей в полупроводниковых кристаллах".

В ходе конференции был организован конкурс докладов молодых ученых. Были отмечены доклады Сарикова А. В. "Солнечные элементы на основе поликристаллического кремния. Теория и эксперимент"

(Киев), Балабана А. П. "Насыщение сигнала в сенсорах оптического изображения на основе неидеального гетероперехода" (Одесса) и другие.

Конференция завершилась принятием решения, в котором, в частности, отмечены значительные успехи в развитии направления "Полупроводниковые фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии" и признано целесообразным создание полигона по гелиоэнергетике в южном регионе Украины на базе ОНУ им. И. И. Мечникова с привлечением соответствующих организаций Украины.

Издан сборник тезисов докладов конференции в двух томах — пленарные и секционные доклады, стендовые доклады. По рекомендации Программного комитета материалы докладов будут опубликованы в журналах "Фотоэлектроника" (ОНУ им. И. И. Мечникова), "Semicond. Phys. Quant. Electron. Optoelectron." (ИФПП НАНУ), "Український фізичний журнал" (НАНУ), "Журнал фізичних досліджень" (Укр. физическое общество), Funktional Materials (Ин-т монокристаллов НАНУ), "Технология и конструирование в электронной аппаратуре".

Принято также решение о регулярном проведении такой конференции с периодичностью в 2—3 года.

Д. ф.-м. н. Я. И. Летиш

Д. ф.-м. н. О. И. ШПОТЮК, к. ф.-м. н. И. В. ГАДЗАМАН,
Р. В. ОХРИМОВИЧ, к. т. н. Н. М. ВАКИВ, к. х. н. С. И. ОСЕЧКИН,
д. ф.-м. н. В. М. ЦМОЦЬ, И. М. БРУНЕЦ

Украина, г. Львов, НПП "Карат"; г. Дрогобыч, Государственный
педагогический университет
E-mail: <shpotyuk@novas.lviv.ua>, <sndlnd@drohobych.net>

Дата поступления в редакцию
25.03 2002 г.

Оппонент д. ф.-м. н. С. Б. УБИЗСКИЙ
(НУ "Львовская политехника", г. Львов)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $(\text{Ni}, \text{Co}, \text{Mn}, \text{Cu})_3\text{O}_4$ ДЛЯ ТОЛСТОПЛЕНОЧНЫХ ТЕРМОРЕЗИСТОРОВ

Показана принципиальная возможность использования полупроводниковой шпинельной керамики на примере системы NiMn_2O_4 — CuMn_2O_4 — MnCo_2O_4 для получения высокостабильных толсто пленочных терморезисторов.

В современных условиях предъявляются все более жесткие требования к стабильности и надежности работы радиоэлектронной аппаратуры при одновременном увеличении ее функциональных возможностей. По мере развития автоматизированных систем управления и промышленной микрокомпьютерной техники возрастает также потребность в разработке новых типов дешевых, унифицированных и эффективных элементов гибридной интегральной микросхемотехники, конструктивно совместимых с разнообразными изделиями электроники. Такими элементами, используемыми, в частности, для термостабилизации, термокомпенсации, термостатирования, теплового контроля и т. п., являются толсто пленочные терморезисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), изготовляемые методом трафаретной печати на основе окислов переходных металлов [1—4]. Это предопределяет значительный интерес к исследованию их структуры, физических свойств, а также технологических особенностей получения.

Обычная технология изготовления толсто пленочных терморезисторов предусматривает использование материала объемного терморезистора соответствующего состава в качестве базового компонента [1]. Такими химическими соединениями являются, в основном, двойные и тройные системы окислов переходных металлов [5]. На их основе разработан целый класс надежных и стабильных толсто пленочных элементов, главным недостатком которых является сравнительно узкий диапазон изменения электрических параметров внутри определенной системы.

С целью расширения диапазона изменения удельного электрического сопротивления ρ и тепловой постоянной B объемных терморезисторов с отрицательным ТКС в работе [6] предложено использовать более сложную полупроводниковую шпинельную электрокерамику системы NiMn_2O_4 — CuMn_2O_4 — MnCo_2O_4 . Одним из оптимальных составов внутри данной системы является $\text{Cu}_{0,1}\text{Ni}_{0,1}\text{Mn}_{1,2}\text{Co}_{1,6}\text{O}_4$,

обладающий необходимыми значениями B и ρ и обеспечивающий достаточно высокую технологическую воспроизводимость и стабильность электрических параметров [6—8]. Предполагается, что использование керамики данного состава при соответствующей технологии ее изготовления даст возможность получить высокостабильные толсто пленочные терморезисторы с постоянной B на уровне объемных образцов.

Целью настоящей работы является отработка типового технологического процесса получения толсто пленочных терморезисторов с пониженной температурой спекания на основе керамической композиции $\text{Cu}_{0,1}\text{Ni}_{0,1}\text{Mn}_{1,2}\text{Co}_{1,6}\text{O}_4$, а также исследование фазового состава, электрических свойств и стабильности полученных толстых пленок.

Объемный образец терморезистора, используемый для получения керамического компонента толстой пленки, синтезирован методом традиционной керамической технологии [9]. В качестве исходных компонентов использовали углекислые соли меди, кобальта, марганца и никеля, взятые в необходимом соотношении. Все компоненты тщательно перемешивались с добавлением дистиллированной воды в яшмовых барабанах планетарной мельницы САНД-1. Время смешивания и помола определялось с учетом степени гомогенизации и дисперсности смеси и, как правило, составляло 16 ч. Полученную смесь просушивали при 378 ± 5 К. Предварительный отжиг смеси производился на воздухе при 970 ± 5 К на протяжении 4 ч. Пресс-порошок получали путем добавления к просушенной шихте 5%-ного водного раствора поливинилового спирта в количестве 0,20—0,40% от веса шихты. Формирование пресс-заготовок диаметром 25 мм и толщиной 2,4 мм осуществляли изостатическим прессованием под давлением 40—100 МПа на гидравлическом прессе ПГ-10. Температурно-временной режим высокотемпературного отжига в печи ВТП-0,1 был выбран с учетом оптимальных условий формирования твердого раствора со структурой шпинели.

Терморезисторная паста для нанесения толстой пленки представляла собой смесь керамического порошка $\text{Cu}_{0,1}\text{Ni}_{0,1}\text{Mn}_{1,2}\text{Co}_{1,6}\text{O}_4$ с органическим и неорганическим связующим. Порошок получался путем измельчения объемного керамического образца данного состава в планетарной мельнице "Fritsch" на протяжении 5 ч со скоростью 130 об/мин с добавлением

изопропилового спирта. Размер частиц порошка после просеивания не превышал 5 мкм. В состав пасты входили 75,76% порошка $\text{Cu}_{0,1}\text{Ni}_{0,1}\text{Mn}_{1,2}\text{Co}_{1,6}\text{O}_4$, 18,94% органического растворителя и органической связки, а также 5,3% смеси порошков стекла и Bi_2O_3 . Полученную пасту наносили на подложки из оксида алюминия Al_2O_3 (Rubalit 708S) методом трафаретной печати на станке DFS-0,1, оборудованного стальной сеткой. На поверхность подложки предварительно были нанесены серебряные электрические контакты в виде полосок.

Толсто пленочные терморезисторы планарного типа изготавливались в одно- и двухслойном исполнении с целью изучения влияния толщины пленки на параметры и стабильность изделий. Толщина однослойного образца составляла ~48 мкм, двухслойного — ~92 мкм. Отжиг толстой пленки производился в конвейерной печи BTU (Англия) путем медленного повышения температуры до 1120 К с последующей изотермической выдержкой на протяжении 15 мин и охлаждением до комнатной температуры согласно заданному режиму. После отжига толстая пленка имела следующий химический состав: 93,5% керамики $\text{Cu}_{0,1}\text{Ni}_{0,1}\text{Mn}_{1,2}\text{Co}_{1,6}\text{O}_4$, 2,8% Bi_2O_3 и 3,7% стекла НТ-521-4. Конструктивные особенности полученных толсто пленочных терморезисторов показаны на рис. 1 (1 — подложка; 2 — электрод, 3 — толстая пленка).

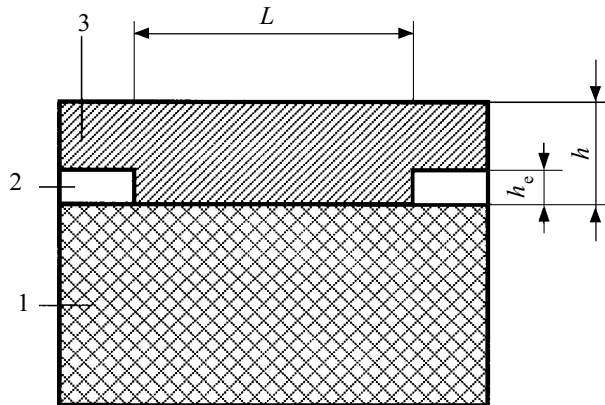


Рис. 1. Конструкция толсто пленочных терморезисторов ($L = 2$ мм, $h = 48$ мкм, $h_e = 18$ мкм)

Электрическое сопротивление измерялось между выбранными электрическими контактами при строго контролируемой температуре окружающей среды.

Во время теста на старение полученные толсто пленочные терморезисторы выдерживались на протяжении 1000 ч при температуре 443 К. Измерения сопротивления производились периодически (через 24, 48, 144, 251, 356, 500, 750 и 1000 ч) при температуре 298 К.

Методом оптической микроскопии с увеличением $\times 576$ установлено, что полученные толсто пленочные терморезисторы характеризуются хорошей морфологией структуры, высокой плотностью вещества терморезистора и достаточно гладкой поверхностью. Исследование материала толстой пленки с помощью электронного микроскопа "Akashi" (увеличение $\times 2500$) показало, что микроструктура состоит из однородно распределенных зерен, которые обволаки-

вает стеклофаза. Размер зерен не превышает 4 мкм (рис. 2), что приблизительно совпадает с аналогичным размером для объемных образцов [7].

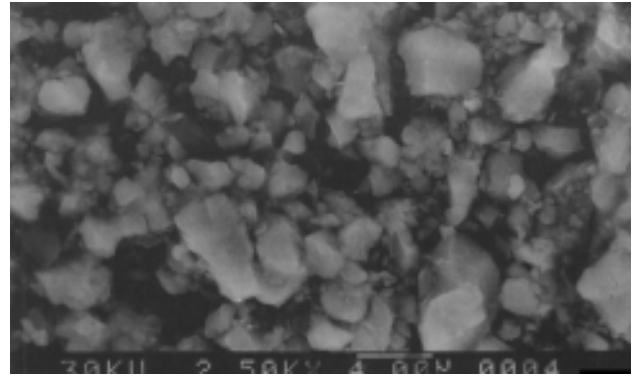


Рис. 2. Микроструктура толсто пленочного терморезистора состава $\text{Cu}_{0,1}\text{Ni}_{0,1}\text{Mn}_{1,2}\text{Co}_{1,6}\text{O}_4$, полученная методом электронной микроскопии

Результаты исследований толсто пленочных и объемных терморезисторов методом рентгеновской дифракции (дифрактометр HZG-4a) показали, что в обоих случаях основной фазой является материал с хорошо сформированной структурой шпинели. Примесных фаз в структуре толсто пленочной шпинели не обнаружено.

На рис. 3 показаны температурные зависимости сопротивления (R) толстых пленок терморезисторов в одно- и двухслойном исполнении. Линейный характер зависимости $\ln R = f(1/T)$ позволяет сделать вывод, что в рассматриваемом диапазоне температур данная зависимость адекватно описывается выражением [5, с. 281]

$$R(T) = R_{298} \exp(B/T - B/298), \quad (1)$$

где R_{298} — сопротивление при температуре $T = 298$ К.

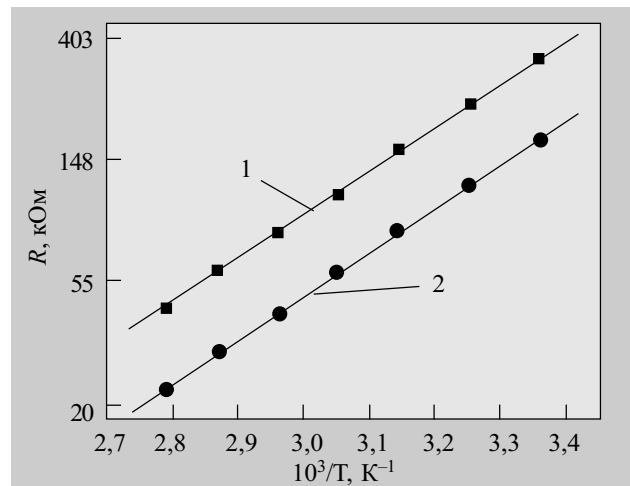


Рис. 3. Температурные зависимости сопротивления толсто пленочных терморезисторов состава $\text{Cu}_{0,1}\text{Ni}_{0,1}\text{Mn}_{1,2}\text{Co}_{1,6}\text{O}_4$: 1 — однослойный терморезистор; 2 — двухслойный терморезистор

Сопротивление типичного участка однослойной толстой пленки шириной 2 мм и толщиной 50 мкм составляет ~350 кОм и уменьшается практически прямо пропорционально толщине. Тепловая постоянная B для толсто пленочных терморезисторов в одно-

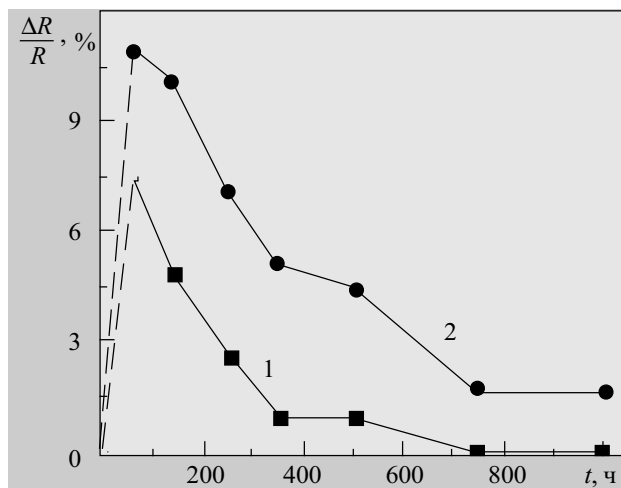


Рис. 4. Зависимость относительного изменения сопротивления от времени (t) при $T=443$ К для толсто пленочных терморезисторов состава $\text{Cu}_{0,1}\text{Ni}_{0,1}\text{Mn}_{1,2}\text{Co}_{1,6}\text{O}_4$: 1 – однослойный терморезистор; 2 – двухслойный терморезистор

и двухслойном исполнении находится на уровне 3630 ± 5 К, в то время как для объемных образцов — 3530 ± 5 К.

Как известно, мерой стабильности электрических параметров терморезисторов служит величина относительного изменения сопротивления при определенной температуре старения. Результаты проведенного теста на старение при 443 К представлены на **рис. 4**. Наблюдается значительное увеличение сопротивления пленок на начальных стадиях термоэкспонирования с последующим постепенным уменьшением. (Заметим, что объемные терморезисторы проявляют такой же характер зависимости $\Delta R/R_0 = f(t)$ в процессе термодегradации.)

Данный эффект (назовем его условно эффектом усталости термодегradации толсто пленочных терморезисторов) ранее не наблюдался для этого типа материалов. Максимальное изменение сопротивления однослойного терморезистора достигает $\sim 7,5\%$ после 64-часовой выдержки исследуемых образцов при вышеуказанной температуре. Однако уже после 750 ч старения сопротивление толстых пленок практически полностью восстанавливается. В то же время для двухслойного образца терморезистора $\Delta R/R_0 \approx 11\%$ при $t=64$ ч, а после 750 ч старения эта величина устанавливается на постоянном уровне $\sim 1,8\%$. Следовательно, увеличение толщины образца толсто пленочного терморезистора приводит к ухудшению временной стабильности его электросопротивления.

На сегодняшний день интерпретация механизмов старения терморезисторной керамики является довольно сложной задачей и базируется, в основном, на соответствующих реакциях окислации или деоксидации [9–13]. Предполагается, что механизм старения толсто пленочных терморезисторных элементов может быть связан с несовершенством межзеренных границ, сформированных в условиях относительно низких температур спекания [14, 15].

Таким образом, нами получены структурно-однородные толсто пленочные терморезисторы на основе

керамики состава $\text{Cu}_{0,1}\text{Ni}_{0,1}\text{Mn}_{1,2}\text{Co}_{1,6}\text{O}_4$, обладающие высоким значением тепловой постоянной B и стабильными во времени электрическими параметрами. Увеличение толщины пленки приводит к пропорциональному уменьшению сопротивления терморезисторов с ухудшением его временной стабильности.

Аномальное поведение кинетики термодегradации $\Delta R/R_0 = f(t)$ толстых пленок требует более детального изучения.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ikegami A., Arima H., Tosaki H. et al. Thick-film thermistor and its applications // IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology.— 1980.— Vol. CHMT-3, N 4.— P. 541—550.
2. Zhong J., Bau H. H. Thick-film thermistors printed on LTCC tapes // Amer. Ceram. Soc. Bull.— 2001.— Vol. 8, N 10.— P. 39—42.
3. Захаров В. И., Олеск А. О. Пленочные терморезисторы // Зарубежная электронная техника.— 1983.— № 5.— С. 43—74.
4. Захаров В. И., Олеск А. О. Материалы и технология изготовления толсто пленочных терморезисторов с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления // Электронная техника. Сер. Радиодетали и радиокомпоненты.— 1989.— Вып. 3.— С. 30—34.
5. Шефтель И. Т. Терморезисторы.— М.: Наука, 1972.
6. Гадзаман І. В. Терморезисторні елементи струмового захисту на основі керамічних напівпровідникових композитів $\text{Cu}_x\text{Ni}_{1-x-y}\text{Co}_y\text{Mn}_{2-y}\text{O}_4$.— Автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук.— Держ. ун-т «Львівська політехніка», Львів, 1999.
7. Shpotyuk O., Kovalskiy A., Mrooz O. et al. Technological modification of spinel-based $\text{Cu}_x\text{Ni}_{1-x-y}\text{Co}_y\text{Mn}_{2-y}\text{O}_4$ ceramics // J. Europ. Ceram. Soc.— 2001.— Vol. 21.— P. 2067—2070.
8. Vakiv M., Shpotyuk O., Mrooz O., Hadzaman I. Controlled thermistor effect in the system $\text{Cu}_x\text{Ni}_{1-x-y}\text{Co}_y\text{Mn}_{2-y}\text{O}_4$ // Ibid.— 2001.— Vol. 21.— P. 1783—1785.
9. Тернауер Х. Процессы керамического производства.— М.: ИЛ, 1980.
10. Hosseini M. The effect of cation composition on the electrical properties and ageing of Mn—Co—Ni thermistors // Ceramics International.— 2000.— Vol. 26.— P. 245—249.
11. Battault T., Legros R., Brieu M. et al. Correlation between microstructure and ageing of iron manganite thermistors // J. de Physique III.— 1997.— Vol. 7.— P. 979—992.
12. Castelan P., Bui Ai, Loubiere A. et al. Ageing study of NTC thermistors by thermopower measurements // Sensors and Actuators A.— 1992.— Vol. 33.— P. 119—122.
13. Csete de Györgyfalva G. D. C., Reaney I. M. Decomposition of NiMn_2O_4 spinel: an NTC thermistor material // J. Europ. Ceram. Soc.— 2001.— Vol. 21.— P. 2145—2148.
14. Groen W.A. Aging of NTC ceramics in the system Mn—Ni—Fe—O // Ibid.— 2001.— Vol. 21.— P. 1793—1796.
15. Schmidt R., Stiegelschmitt A., Roosen A., Brinkman A.W. Preparation and performance of thick film NTC thermistors // Key Engineering Materials.— 2002.— Vol. 206—213.— P. 1417—1420.

К. ф.-м. н. М. В. ДМИТРИЕВ

Украина, г. Одесса,
Науч.-исследов. технологич. ин-т "Темп"Дата поступления в редакцию
05.03 2001 г.Оппонент д. ф.-м. н. В. В. НОВИКОВ
(ОНПУ, г. Одесса)СТЕПЕННАЯ СВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА И ЕГО КОМПОНЕНТОВ

Установлена степенная зависимость диэлектрических свойств композита от параметров компонентов, подтвержденная экспериментами и логарифмическим законом смешивания компонентов.

При создании новых композиционных материалов (композитов) с отличающимися техническими и эксплуатационными характеристиками возникает необходимость использования аналитических способов исследования их свойств, которые должны позволить:

— оценить величину параметра композита по величине соответствующего параметра выбираемых компонентов;

— определить нужную величину параметра одного из выбираемых компонентов для обеспечения требуемой величины соответствующего параметра композита, если известны параметры остальных компонентов;

— оценить величины параметров компонентов, достигаемые в конце синтеза композита, по величине параметра композита, найденной экспериментально;

— прогнозировать величину параметров композита для разных соотношений его компонентов по экспериментальному значению параметра образца одного из составов.

Подобные расчеты позволяют существенно сократить длительность разработки и затрачиваемые средства при поиске композита с нужными свойствами за счет уменьшения количества экспериментальных проб.

В работах [1—3] проверена пригодность для расчета параметров стеклокерамического композиционного материала (СКМ) трех известных формул, предложенных для двухкомпонентных композитов — Лихтенеккером и Ротером:

$$\ln N = y_1 \ln N_1 + y_2 \ln N_2, \quad (1)$$

Баером:

$$N^{1/2} = y_1 N_1^{1/2} + y_2 N_2^{1/2}, \quad (2)$$

Ландау и Лифшицем:

$$N^{1/3} = y_1 N_1^{1/3} + y_2 N_2^{1/3}, \quad (3)$$

где N , N_1 , N_2 — параметры композита, первого и второго компонентов, соответственно;

y_1 , y_2 — объемные доли этих компонентов.

В результате установлена пригодность формулы (1) для вычисления диэлектрических параметров (D) стеклокерамики: удельного объемного электросопротивления ρ , диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ [1—3]. Рассчитанные по формулам (2) и (3) значения ϵ относительно близки к экспериментальным [1]. Однако существенное расхождение между экспериментом и расчетами параметров ρ и $\operatorname{tg} \delta$ в СКМ исключает их определение с помощью формулы Ландау и Лифшица и формулы Баера [2, 3]. Критерием применимости этих формул, согласно [2], является условие о не слишком больших отличиях величин параметров у разных компонентов, что для ρ и $\operatorname{tg} \delta$ в СКМ оказалось невыполнимым.

Из [4] следует, что замена показателя степени (t) в формулах (2) и (3) на 1/100 приводит к сближению рассчитанных значений ϵ с экспериментальными величинами. Однако в [4] не исследовано влияние величины показателя t на рассчитываемые параметры ρ и $\operatorname{tg} \delta$. Кроме того, в [4] не заданы пределы величины t , при которых степенная формула пригодна для расчетов всех диэлектрических параметров композита независимо от его состава.

Таблица 1

Исходные данные для расчетов

Параметры компонентов		СКМ-1	СКМ-2	СКМ-3	СКМ-4
Объемная доля	y_c	0,848	0,505	0,403	0,362
	y_n	0,152	0,495	0,490	0,280
	y_ϕ	0	—	0,107	0,079
	y_n	0	0	0	0,279
Диэлектрическая проницаемость	ϵ_c	6,92	5,71	8,38	8,38
	ϵ_n	11	11	11	11
	ϵ_ϕ	0	—	6,72	6,72
	ϵ_n	0	0	0	1,05
Удельное объемное электросопротивление	ρ_c	$6,55 \cdot 10^9$	$1,05 \cdot 10^{11}$	$6,52 \cdot 10^8$	$6,52 \cdot 10^8$
	ρ_n	10^{13}	10^{13}	10^{13}	10^{13}
	ρ_ϕ	0	—	$5 \cdot 10^{13}$	$5 \cdot 10^{13}$
	ρ_n	0	0	0	$2,25 \cdot 10^4$
Тангенс угла диэлектрических потерь	$\operatorname{tg} \delta_c$	0,022	$3,77 \cdot 10^{-3}$	0,984	0,984
	$\operatorname{tg} \delta_n$	10^{-5}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-5}
	$\operatorname{tg} \delta_\phi$	0	—	10^{-6}	10^{-6}
	$\operatorname{tg} \delta_n$	0	0	0	0,952

Рассмотрим возможность нахождения такой величины показателя степени t , при которой результаты расчета параметров ρ , ϵ и $\text{tg}\delta$ по степенной формуле совпадут с экспериментом и с расчетами по логарифмической формуле (1). Кроме того, проверим, существует ли влияние на величину искомого показателя t количества используемых компонентов и их материала.

С этой целью используем в качестве исходных данных величины объемных долей и диэлектрических параметров компонентов, а также экспериментальные значения параметров D_3 в СКМ, найденные в [1—3, 5—8] для композитов с отличающимися составами (см. табл. 1). (Здесь и далее по тексту параметр ρ выражен в Ом·м; индексы "с", "н", "п" и "ф" обозначают принадлежность параметров стеклу, наполнителю, порам и кристаллизующей при спекании фазе, соответственно; СКМ-1 — некристаллизующее кальцевоалюмооборатное стекло, наполнитель [1—3], СКМ-2 — свинцовоборосиликатное стекло с кристаллической фазой, наполнитель [8], СКМ-3 — бариевоборосиликатное стекло, наполнитель, межфазный кристаллический слой [5—7], СКМ-4 — бариевоборосиликатное стекло, наполнитель, межфазный кристаллический слой, поры [5—7].)

В [1—3, 5—8] использованы модельные СКМ, отличающиеся количеством компонентов, материалом стекла, материалом и расположением кристаллизующих при спекании новых фаз (на границе стекла и наполнителя в виде межфазного слоя или в самом стекле). Для всех СКМ в качестве наполнителя использовался кристаллический оксид алюминия (глинозем ГН-1 с 95% $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, ГОСТ 6912—87), измельченный до одинаковой дисперсности.

Параметры компонентов СКМ в [1—3, 5—8] определены по экспериментальным значениям диэлектрических параметров композита. При этом использовалась формула Лихтенеккера и Ротера, которая, согласно [5—8], оказалась пригодной и для расчета параметров СКМ с количеством компонентов $m > 2$:

$$\ln D = \sum_{i=2}^m y_i \ln D_i \quad (4)$$

СКМ-2 (табл. 1) состоит из трех компонентов: наполнителя, остаточного стекла и кристаллизующего в стекле при спекании кристобалита. Однако при расчете по степенной формуле кристаллизующую фазу и остаточное стекло будем рассматривать как один компонент — закристаллизованное стекло с присущими ему диэлектрическими параметрами и объемной долей.

В табл. 2 приведены результаты вычисления параметров ρ , ϵ и $\text{tg}\delta$ разных СКМ с

использованием исходных данных табл. 1. Вычисления осуществлялись по следующим формулам:

для СКМ-1 и СКМ-2 —

$$D^{1/n} = y_c D_c^{1/n} + y_n D_n^{1/n}, \quad (5)$$

для СКМ-3 —

$$D^{1/n} = y_c D_c^{1/n} + y_n D_n^{1/n} + y_f D_f^{1/n}, \quad (6)$$

для СКМ-4 —

$$D^{1/n} = y_c D_c^{1/n} + y_n D_n^{1/n} + y_f D_f^{1/n} + y_p D_p^{1/n}. \quad (7)$$

Показатель степени $t=1/n$ задан в пределах от 1/2 до 10^{-6} (табл. 2). Во всех случаях уменьшению показателя t соответствует уменьшение рассчитанных параметров D от максимально завышенных при $t=1/2$ и $t=1/3$ до величин, практически совпадающих с экспериментальными значениями D_3 . При этом наибольшее расхождение вычисленных и экспериментальных величин при $t=1/2$ имеет место для ρ (~ в 1600 раз) и наименьшее — для ϵ (в 1,01 раза).

Совпадение величин D и D_3 наступает при некоторых значениях $t'=1/n'$. Для разных параметров и разных СКМ величины t' отличаются между собой и соответствуют диапазону от 10^{-2} до 10^{-4} . Дальнейшее уменьшение показателя t (ниже t') не изменяет величину D , равную D_3 (табл. 2).

Из изложенного следует, что при $n \geq n'$ формулы (5) — (7) пригодны для определения диэлектрических параметров СКМ. Результаты расчета совпадают не только с экспериментом, но и с результатами вычислений с помощью логарифмической формулы (4), поскольку они также совпадают с экспериментальными данными [1—3, 5—8].

По аналогии с (4) степенная формула для композитов в общем случае имеет вид

$$D^{1/n} = \sum_{i=2}^m y_i D_i^{1/n}, \quad (8)$$

где $n \geq n'$.

Представленные в табл. 2 результаты получены при относительно большом шаге варьирования величины $1/n$. Это затрудняет определение величины $1/n'$. Затруднение возникает также из-за слабого изменения рассчитанных величин D при варьировании показателя

Таблица 2

Результаты расчета диэлектрических параметров СКМ при разных значениях t

СКМ	D	Показатель степени $t=1/n$									D_3
		1/2	1/3	1/6	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	
СКМ-1	$\rho \cdot 10^{11}$	3,02	1,15	0,42	0,30	0,21	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
	ϵ	7,48	7,46	7,44	7,43	7,43	7,43	7,43	7,43	7,42	7,40
	$\text{tg}\delta$	0,016	0,014	0,011	0,009	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
СКМ-2	$\rho \cdot 10^{11}$	29,9	22,2	15,3	12,9	10,3	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
	ϵ	8,11	8,04	7,97	7,94	7,90	7,90	7,90	7,90	7,90	7,90
	$\text{tg}\delta$	0,0011	0,0007	0,0004	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
СКМ-3	$\rho \cdot 10^{11}$	53,7	32,7	12,9	7,27	2,75	2,47	2,44	2,44	2,44	2,41
	ϵ	9,42	9,40	9,37	9,37	9,35	9,35	9,35	9,35	9,35	9,35
	$\text{tg}\delta$	0,161	0,070	0,013	0,004	0,001	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
СКМ-4	$\rho \cdot 10^9$	2110	795	102	24,9	1,85	1,38	1,34	1,34	1,34	1,35
	ϵ	6,09	5,74	5,37	5,21	5,00	4,98	4,98	4,98	4,98	4,98
	$\text{tg}\delta$	0,400	0,263	0,105	0,054	0,016	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013

теля степени вблизи $1/n'$: граничное значение $1/n'$ "размыто".

Для практического использования формулы (8) необходимо граничную величину показателя степени выразить аналитически. При этом важно установить, влияет ли на величину граничного показателя степени состав композита (количество и материал компонентов). Преобразуем (8) к виду

$$\frac{\ln D}{n} = \ln \left(\sum_{i=2}^m y_i D_i^{1/n} \right). \quad (9)$$

С учетом (4) для случая $n=n'$ получим:

$$\ln D = \sum_{i=2}^m y_i \ln D_i = n' \ln \left(\sum_{i=2}^m y_i D_i^{1/n'} \right) \quad (10)$$

Обозначим $\ln \left(\sum_{i=2}^m y_i D_i^{1/n'} \right)$ через K . Тогда для экспериментальных значений $D_3 > 1$ и $D_3 < 1$ формулу (10) можно представить в виде

$$K = \frac{|\ln D_3|}{n'}. \quad (11)$$

Определим величину K с помощью (11) для параметров ρ_3 , ϵ_3 и $\text{tg} \delta_3$ в исследуемых СКМ, используя примерные значения n' из табл. 2. Тогда получим величины K , приведенные в табл. 3. Они отличаются для разных параметров и разных по составу СКМ более чем на порядок. Среднее значение из полученных величин $K_{\text{ср}} = 0,02$.

Определим значение граничных параметров $n_{\text{гр}}$ для ρ , ϵ и $\text{tg} \delta$ разных СКМ по усредненной величине $K_{\text{ср}}$ с помощью формулы, полученной из (11):

$$n_{\text{гр}} = \frac{|\ln D|}{K_{\text{ср}}} = 50 |\ln D|. \quad (12)$$

Найденные значения $n_{\text{гр}}$ (табл. 3) позволяют вычислить величины D с помощью формул (5)–(7), которые могут быть представлены в виде

$$D = \left(\sum_{i=2}^m y_i D_i^{1/n_{\text{гр}}} \right)^{n_{\text{гр}}}. \quad (13)$$

Вычисленные таким образом значения ρ , ϵ и $\text{tg} \delta$ (табл. 3) очень близки к экспериментальным величинам ρ_3 , ϵ_3 и $\text{tg} \delta_3$. Из этого следует, что независимо от состава СКМ степенные формулы (5)–(7) пригодны для расчета его диэлектрических параметров при использовании найденных с помощью (12) величин $n_{\text{гр}}$, поскольку $n_{\text{гр}} = f(K_{\text{ср}})$.

Из анализа табл. 3 следует, что применимость формулы (13) соответствует величине $D = (1,00 \text{—} 1,03) D_3$. Согласно табл. 3, такое же совпадение рассчитанных и экспериментальных величин D получается, если в формулах (5)–(7) вместо $n_{\text{гр}}$ использовать максимальное значение $n' = 10^4$, взятое из диапазона $n' 10^2 \text{—} 10^4$, наблюдаемого в табл. 2 для разных параметров и разных СКМ; в этом случае $D = (1,00 \text{—} 1,02) D_3$.

Таблица 3

Результаты расчета величин $n_{\text{гр}}$ и диэлектрических параметров СКМ при $n=n_{\text{гр}}$ и $n=10^4$

Рассчитываемые и экспериментальные параметры	СКМ-1	СКМ-2	СКМ-3	СКМ-4
$K = \ln \rho / n'$	0,024	0,028	0,003	0,002
$K = \ln \epsilon / n'$	0,020	0,021	0,022	0,002
$K = \ln \text{tg} \delta / n'$	0,050	0,085	0,007	0,004
$n_{\text{гр}} = 50 \ln \rho$	1186	1382	1310	1051
$n_{\text{гр}} = 50 \ln \epsilon$	100	103	112	80
$n_{\text{гр}} = 50 \ln \text{tg} \delta $	248	426	357	217
$c = \left(\sum_{i=2}^m y_i c_i^{1/n_{\text{гр}}} \right)^{n_{\text{гр}}}$	$2,00 \cdot 10^{10}$	$1,00 \cdot 10^{12}$	$2,47 \cdot 10^{11}$	$1,38 \cdot 10^9$
$\epsilon = \left(\sum_{i=2}^m y_i \epsilon_i^{1/n_{\text{гр}}} \right)^{n_{\text{гр}}}$	7,426	7,904	9,353	5,008
$\text{tg} D = \left(\sum_{i=2}^m y_i \text{tg} D_i^{1/n_{\text{гр}}} \right)^{n_{\text{гр}}}$	0,007	0,0002	0,0008	0,014
$c = \left(\sum_{i=2}^m y_i c_i^{1/10^4} \right)^{10^4}$	$2,00 \cdot 10^{10}$	$1,00 \cdot 10^{12}$	$2,45 \cdot 10^{11}$	$1,34 \cdot 10^9$
$\epsilon = \left(\sum_{i=2}^m y_i \epsilon_i^{1/10^4} \right)^{10^4}$	7,43	7,90	9,35	4,98
$\text{tg} D_i = \left(\sum_{i=2}^m y_i \text{tg} D_i^{1/10^4} \right)^{10^4}$	0,007	0,0002	0,0008	0,013
ρ_3	$2 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10^{12}$	$2,41 \cdot 10^{11}$	$1,35 \cdot 10^9$
ϵ_3	7,40	7,90	9,35	4,98
$\text{tg} \delta_3$	0,007	0,0002	0,0008	0,013

Величина $n' = 10^4$ вполне достаточна для обеспечения правильности расчета по степенной формуле для всего диапазона практически встречаемых величин D . Так, даже при $D = 10^{24}$ $n' < 10^4$ и составляет, согласно (12), всего $2,9 \cdot 10^3$.

Факт сближения результатов вычисления величин D по степенной (8) и логарифмической (4) формулам при $n=n_{\text{гр}}$ можно объяснить, рассматривая полученное из (10) выражение

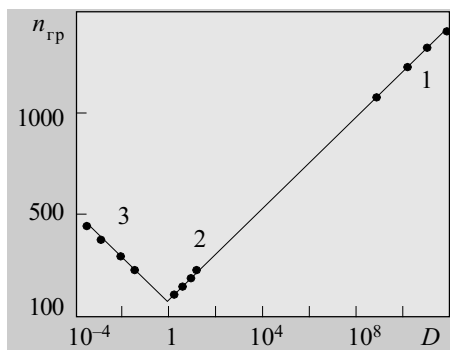
$$\frac{\sum_{i=2}^m y_i \ln D_i}{n_{\text{гр}}} \approx \ln \left(\sum_{i=2}^m y_i D_i^{1/n_{\text{гр}}} \right). \quad (14)$$

Рост n до величины $n_{\text{гр}}$ приводит к тому, что левая часть (14) приближается к нулевому значению, поскольку

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{\sum_{i=2}^m y_i \ln D_i}{n} \right) = 0. \quad (15)$$

К нулевому значению приближается и правая часть (14), поскольку

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left[\ln \left(\sum_{i=2}^m y_i D_i^{1/n} \right) \right] = 0. \quad (16)$$



Зависимость $n_{гр}$ от величины диэлектрических параметров СКМ:

1 — область удельного объемного электросопротивления ρ ; 2 — ϵ ; 3 — $\tan \delta$

Это связано с тем, что $\lim_{n \rightarrow \infty} D_i^{1/n} = 1$, т. к. при этом

$1/n=0$. В этом случае $\sum_{i=2}^m y_i D_i^{1/n} = \sum_{i=2}^m y_i = 1$, т. к. сумма

объемных долей компонентов равна единице. Поэтому

$\ln \left(\sum_{i=2}^m y_i D_i^{1/n} \right) = \ln 1 = 0$. Как показали выполненные

вычисления, наблюдаемое приближение к нулю левой и правой частей (14) при $n=n_{гр}$ приводит к их примерному равенству.

На рисунке показан удобный для практического использования график зависимости найденных с помощью (12) значений $n_{гр}$ от величины диэлектрических параметров ρ , ϵ и $\tan \delta$. В полулогарифмическом масштабе он представлен прямыми линиями, пересекающимися при $D=1$. Этот график позволяет оценить значения $n_{гр}$ также и за пределами D , приведенными на рисунке, если воспользоваться методом экстраполяции.

Формула (13) может быть использована:

— для расчета диэлектрических свойств композитов по величине $n_{гр}$, оцененной с помощью графика $n_{гр}=f(D)$, если известен хотя бы порядок величин D ;

— для определения диэлектрических свойств компонентов по методикам [1—3, 5—7], использующим величины D_j , что важно для прогнозирования свойств

композитов с разным соотношением компонентов по свойству композита одного из составов.

В результате выполненных исследований экспериментально установлен альтернативный вариант расчета диэлектрических свойств композитов с помощью новой степенной формулы. Показатель степени при диэлектрических параметрах в этой формуле должен быть в пределах от 10^{-4} до граничного значения, задаваемого аналитически величиной в функции диэлектрического параметра композита.

Полученные результаты могут быть полезны при определении диэлектрических свойств различных СКМ и иных композитов — керамики, стеклокристаллических материалов, толстых пленок, содержащих стекло и функциональный материал, и т. п. Это даст экономию времени и средств при разработке таких композитов за счет замены части экспериментальных проб аналитическими исследованиями.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Дмитриев М. В. Влияние концентрации компонентов и пор на диэлектрическую проницаемость стеклокерамики // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 1997. — № 4. — С. 34—38.
2. Дмитриев М. В. Влияние концентрации компонентов и пор на диэлектрические потери в стеклокерамике // Там же. — 1998. — № 1. — С. 39—43.
3. Дмитриев М. В. Влияние концентрации компонентов и пор на электросопротивление стеклокерамики // Там же. — 1998. — № 2. — С. 43—47.
4. Дмитриев М. В. Способы прогнозирования параметров стеклокерамики с межфазным слоем // Там же. — 2001. — № 6. — С. 16—19.
5. Дмитриев М. В. Стеклокерамика с продуктом взаимодействия стекла и наполнителя: электросопротивление // Там же. — 1998. — № 3—4. — С. 56—61.
6. Дмитриев М. В. Стеклокерамика с продуктом взаимодействия стекла и наполнителя: диэлектрические потери // Там же. — 1999. — № 2—3. — С. 44—48.
7. Дмитриев М. В. Стеклокерамика с продуктом взаимодействия стекла и наполнителя: диэлектрическая проницаемость // Там же. — 1999. — № 4. — С. 44—46.
8. Дмитриев М. В. Влияние режимов спекания на параметры стеклокерамики с кристаллизующим стеклом // Там же. — 2000. — № 1. — С. 36—39.

Редакция журнала

"Технология и конструирование в электронной аппаратуре"

просит Вас поинтересоваться,

подписана ли Ваша организация на журнал "ТКЭА" на 2003 год (индекс в подписных каталогах — 71141, периодичность — 6 номеров в год).

Подписку можно оформить не только в почтовом отделении, но и непосредственно через редакцию, начиная с любого номера. Для этого направьте заявку по адресу: Украина, 65005, Одесса, ул. Прохоровская, 45, редакция "ТКЭА"

или по e-mail: tkea@odessa.net

К. т. н. В. В. ДАНИЛОВ

Украина, г. Донецк, НИИ комплексной автоматизации
E-mail: danilov@dongu.donetsk.uaДата поступления в редакцию
15.04 2002 г.Оппонент д. ф.-м. н. О. И. ШПОТЮК
(НПП "Карат", г. Львов)

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МОНОКРИСТАЛЛОВ ДЛЯ СВЕТОЗВУКОПРОВОДОВ АКУСТООПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Исследованы физико-технические параметры монокристаллов бромид-йодида (КРС-5) и бромид-хлорида (КРС-6) таллия, а также монокристаллов каломели (Hg_2Cl_2).

Акустооптические устройства предназначены для управления лазерным пучком и находят применение в лазерных технологиях, например обработки информации [1]. Принцип действия любого акустооптического устройства (АОУ) основан на фотоупругом эффекте, проявляющемся при акустооптическом взаимодействии (АОВ) световой и акустических волн, распространяющихся в изотропной или анизотропной среде. Основными материалами, применяемыми в качестве светозвукопроводов (СЗП) акустооптических устройств, являются монокристаллы. Знание физико-технических параметров монокристаллов, в частности, акустооптических, необходимо в процессе моделирования и проектирования АОУ [1—4].

Основываясь на работах [1, 4], выделяют следующие требования к акустооптическим параметрам монокристаллов:

- акустооптическая добротность, $M_2 \geq 10 \cdot 10^{-18} \text{ с}^3/\text{Г}$;
- скорость акустической волны, $V \leq 2000 \text{ м/с}$;
- затухание акустической волны, $\alpha \leq 20 \text{ дБ}/(\text{м} \cdot \text{ГГц}^2)$;
- светопропускание в диапазоне длин волн 0,28...20 мкм, не менее 50%.

Так как светозвукопровод АОУ в составе прибора подвержен влиянию эксплуатационных, климатических и транспортных факторов, дополнительными требованиями являются:

- устойчивость к воздействию лазерного излучения;
- температурная устойчивость электрических и магнитных свойств монокристаллов в области $-20 \dots +40^\circ\text{C}$;
- отсутствие химической активности по отношению к контактирующим материалам;
- химическая устойчивость при химико-механической обработке;
- наличие адгезии к материалам переходных слоев;
- наличие адгезии к материалам просветляющих и защитных покрытий.

Исследования монокристаллов каломели (Hg_2Cl_2)

Внешний вид образца монокристалла каломели показан на **рис. 1**. Кристаллы каломели тетрагональной сингонии, имеют соотношение параметров решетки $c/a=2,437$ [3, с. 38]. Для всех измерений физико-технических параметров монокристаллов, в т. ч. и акустооптических, методами химико-механической обработки изготавливались образцы размерами $10 \times 10 \times 10 \text{ мм}$, вырезанные вдоль главных кристаллографических осей.

Минимальная скорость акустической волны в Hg_2Cl_2 соответствует сдвиговой моде колебаний вдоль кристаллографического направления $[110]$ и составляет $345 \pm 10 \text{ м/с}$. Результаты измерений затухания акустической волны на частотах 60—300 МГц, приведенные к общепринятой единице измерения $\text{дБ}/(\text{м} \cdot \text{ГГц}^2)$, показаны на **рис. 2**. Анализ частотной зависимости затухания акустической волны показывает, что она описывается кривой, близкой к квадратичной функции, которая ограничивает частотный диапазон использования устройств на Hg_2Cl_2 величиной порядка 100 МГц.

Оптимальным режимом акустооптического взаимодействия в каломели является анизотропный, с возбуждением сдвиговой волны в направлении $[110]$. Центральная частота полосы пропускания для этого режима подчиняется известной зависимости для анизотропного АОВ [4]:

$$f_0 = (V/\lambda)(n_i^2 - n_d^2)^{0,5},$$

где λ — длина оптической волны;

n_i и n_d — показатели преломления для падающего и дифрагировавшего света, соответственно.

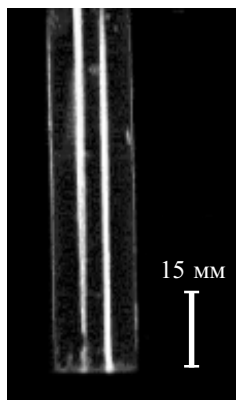


Рис. 1. Монокристалл Hg_2Cl_2

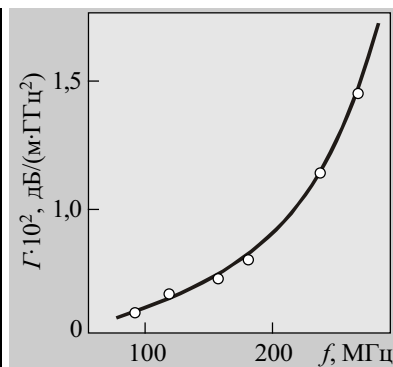


Рис. 2. Частотная зависимость затухания акустической волны в Hg_2Cl_2

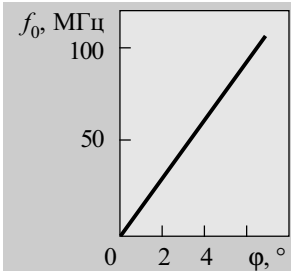


Рис. 3. Зависимость центральной частоты АОЯ от угла наклона оптической оси среды АОВ

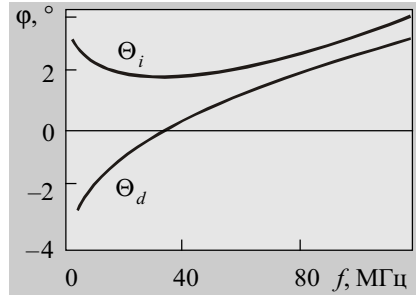


Рис. 4. Зависимость углов падения и дифракции оптических лучей в анизотропной АОЯ от частоты

Полное двойное лучепреломление наступает на частоте радиосигнала порядка 600 МГц, на $\lambda=0,85$ мкм (где пренебречь затуханием нельзя). Более низкую центральную частоту, ~ 100 МГц, можно реализовать путем наклона оптической оси кристалла на угол ϕ в плоскости падения лазерного луча. Зависимость центральной частоты акустооптической ячейки (АОЯ) устройства от ϕ показана на **рис. 3**.

Измерение углов падения (Θ_i) и дифракции (Θ_d) света анизотропной акустооптической ячейки на Hg_2Cl_2 осуществлялись на оптической скамье с применением гелий-неонового лазера. Так как обе оптические грани ячейки срезаны параллельно направлению распространения акустической волны, внутренние углы были вычислены исходя из измерения внешних углов.

Диапазон оптической прозрачности Hg_2Cl_2 определялся с помощью спектрофотометров СФ-26 и ИКС-29 и лежит в области длин волн 0,3—25 мкм. Кристалл является одноосным с ярко выраженным двулучепреломлением на длине оптической волны 0,63 мкм. Показатели преломления для обыкновенной и необыкновенной волн собственно равны $n_o=2,62$ и $n_e=1,96$ ($\lambda=0,63$ мкм) и измерялись методом призмы.

Результаты измерения углов падения и дифракции света показаны на **рис. 4**. Как следует из графика, центральная частота АОЯ равна 38 МГц. При оптической апертуре 0,03 м (время задержки 86 мкс) величина произведения ширины спектра на длительность сигнала для акустооптического устройства с такой АОЯ может составлять рекордную величину — порядка 3000.

Исследования монокристаллов бромид-йодида (КРС-5) и бромид-хлорида (КРС-6) таллия

Анализ перспективности использования монокристаллов КРС-5 и КРС-6 в акустооптических применениях показан в [1]. Монокристаллы кубической сингонии КРС-5 и КРС-6 с постоянной решетки 4,125 и 3,905 Å, соответственно, относятся к так называемым твердым растворам [5, с.127, 132]. Согласно [6], в этой системе возможно кристаллообразование, по крайней мере, 10—12 соединений с разным процентным соотношением галогенидов таллия. Исследованные КРС-5 и КРС-6 имели состав соответ-

ственно 42 мас.% TlI и 58 мас.% TlBr , 30 мас.% TlCl и 70 мас.% TlBr .

Плотность КРС-5 и КРС-6. Измерения производились методом гидростатического взвешивания в толуоле (в области комнатных температур) и визуально — полтермическим методом (в области 100—700 К). В области комнатных температур (18—22°C) плотность КРС-5 составляет 7,37 кг/м³, КРС-6 — 7,19 кг/м³.

Затухание продольных и поперечных акустических волн, а также их скорости измерялись на установке и по методу, описанному в [2].

Для КРС-5 (в м/с): $V_{L[100]}=2146\pm 5$, $V_{L[111]}=1930\pm 3$, $V_{L[010]}=1979\pm 8$, $V_{L[001]}=1941\pm 5$, $V_{S[100]}=890\pm 10$, $V_{S[010]}=1215\pm 10$, $V_{S[001]}=115\pm 10$.

Для КРС-6 (в м/с): $V_{L[100]}=2300\pm 10$, $V_{L[111]}=2150\pm 10$, $V_{L[010]}=2200\pm 10$, $V_{L[001]}=2160\pm 10$, $V_{S[100]}=1,02\pm 10$, $V_{S[010]}=1250\pm 10$, $V_{S[001]}=1238\pm 10$.

Здесь V — скорость акустической волны; в квадратных скобках указано кристаллографическое направление, вдоль которого распространялась акустическая волна продольной (L) или поперечной (S) моды. Минимальное затухание акустической волны для КРС-5 соответствует кристаллографическим направлениям $[100]$ и $[111]$ на продольной моде колебаний и составляет 9 и 25 дБ/(ГГц²·м), соответственно. Для монокристалла КРС-6 минимальное затухание акустической волны соответствует кристаллографическим направлениям $[100]$ и $[111]$ на поперечной моде колебаний и составляет 40 и 10 дБ/(ГГц²·м), соответственно.

Акустооптическая добротность (M_2) монокристаллов измерялась на установке и по методу, приведенному в [2]. Для КРС-5 максимальное значение $M_2=(n^6 p^2)/(\rho V^3)$ соответствует продольной акустической волне, распространяющейся вдоль кристаллографического направления $[111]$, и равно $1200 \cdot 10^{13}$ с³/кг. (Здесь p — фотоупругая постоянная, ρ — плотность монокристалла.) Для кристалла КРС-6 максимальная акустооптическая добротность равна $800 \cdot 10^{13}$ с³/кг и соответствует поперечной акустической волне, распространяющейся вдоль кристаллографического направления $[100]$.

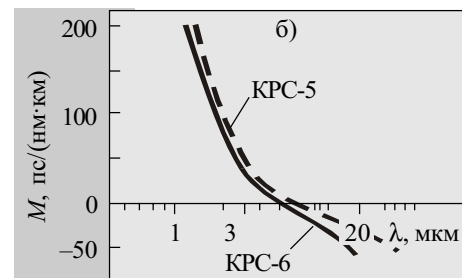
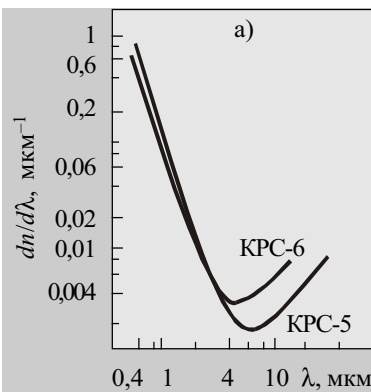


Рис. 5. Дисперсия показателя преломления (а) и спектральная зависимость материальной дисперсии (б) для кристаллов КРС-5 и КРС-6

Коэффициент спектрального пропускания (%) монокристаллов КРС-5 и КРС-6

Кристалл	L, мм	Длина волны, мкм											
		0,41	0,45	0,6	1,0	1,5	10	20	25	30	40	45	50
КРС-5	25	—	—	48	62	71	71	75	72	65	10	8	—
	10	—	—	52	67	71	71	75	72	70	22	12	—
	1	—	—	64	68	72	72	75	74	72	22	12	—
КРС-6	25	10	50	64	72	72	75	71	42	12	—	—	—
	10	14	54	67	74	74	75	73	45	12	—	—	—
	1	43	59	70	75	74	75	74	56	18	—	—	—

Показатель преломления КРС-5 и КРС-6 измерялся методом призмы [7]. На длине волны лазерного излучения 0,63 мкм он равняется 2,57 и 2,33, соответственно.

Дисперсия ($dn/d\lambda$) и спектральная зависимость материальной дисперсии ($d^2n/d\lambda^2 \cdot \lambda$) кристаллов измерялись на установке и по методике, приведенным в [7]. Результаты измерений представлены на рис. 5.

Коэффициенты спектрального пропускания монокристаллов в зависимости от толщины образца исследовались на приборе IFS-110. Результаты измерений приведены в таблице. Зависимость спектрального пропускания монокристаллов КРС-5 и КРС-6 от температуры приведена в работе [6].

Фотохимическое окрашивание монокристаллов зарегистрировано не было, что, в соответствии с работой [6] («...фоторазложение галогенидов таллия практически не наблюдается при длительной засветке, если исходное сырье тщательно очищено от примеси двухвалентных металлов»), подтверждает правильность выбранных режимов очистки исходных веществ при синтезе соединений.

Лазерная (лучевая) прочность. Исследования образцов-заготовок КРС-5 и КРС-6 обозначенных выше составов проводились на установке и по методике, изложенным в работе [8], при этом длительность светового импульса составляла 1 мс, длительность паузы — 1,5 мс, частота следования импульсов — 400 Гц. При мощности СО- и СО₂-лазеров на основных линиях генерации 2 и 20 Вт, соответственно, и диаметре лазерного пучка 6 мм смоделированы плотности мощности 0,18 и 1,8 кВт/см². При времени экспозиции 20 мин, т. е. когда устанавливалось динамическое равновесие температуры образца с температурой окружающей среды, измерялось светопропускание кристаллов (при этом разница температур по образцу не превышала 0,1—0,5°C). Контроль светопропускания осуществлялся на спектрометре IFS-110; значение его отличалось от приведенных в таблице не более чем на доли процента. В результате сделано заключение о лучевой прочности кристаллов при таких уровнях излучения.

Оптические потери КРС-5 и КРС-6 измерялись на установке и по методу, приведенным в [8]. Измерения позволили сделать заключение, что минимум потерь кристаллов КРС-6 приходится на длину волны 7,9 мкм и составляет величину $10 \cdot 10^{-4}$ дБ/км. Для кристаллов типа КРС-5 оптимальная длина волны равна 12—13 мкм, при этом поглощение равно $(6 \dots 7) \cdot 10^{-4}$ дБ/км.

Заключение

Исследованиями физико-технических параметров монокристаллов КРС-5 (42 мас.% TlI и 58 мас.% TlBr) и КРС-6 (30 мас.% TlCl и 70 мас.% TlBr), используемых в качестве светозвукопроводов акустооптических устройств, установлены: плотность; скорости и затухание поперечных и продольных акустических волн; акустооптическая добротность; показатели преломления, их дисперсия и зависимость материальной дисперсии; спектральное пропускание; отсутствие фотохимического окрашивания кристаллов; лазерная прочность монокристаллов; оптические потери.

Исследованиями монокристаллов Hg₂Cl₂ (каломе-ли), предлагаемых для использования в качестве светозвукопроводов АОУ, установлены: диапазон оптической прозрачности; наличие ярко выраженного двулучепреломления; показатели преломления; минимальная скорость акустической волны; частотная зависимость затухания; оптимальный режим дифракции; частота радиосигнала, на которой наступает полное двулучепреломление кристалла; зависимость центральной частоты акустооптического взаимодействия от угла наклона оптической оси кристалла в плоскости падения лазерного пучка.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Данилов В. В. Материалы и технология реализации акустооптических устройств // Мат-лы VI междунар. Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — Севастополь. — 1996. — С. 452—455.
2. Данилов В. В. Основы метрологического контроля технических характеристик акустооптических устройств // Радиотехника (Всеукр. науч.-техн. сб.). — 2002. — № 124. — С. 148—157.
3. Винчелл А. Н., Винчелл Г. Н. Оптические свойства искусственных минералов. — М.: Мир, 1967.
4. Данилов В. В. Акустооптические дефлекторы систем оптической памяти с побитовым представлением информации // Радиотехника (Всеукр. науч.-техн. сб.). — 2000. — № 116. — С. 125—132.
5. Воронкова Е. М., Гречушников Б. А., Дистлер Г. И., Петров И. П. Оптические материалы инфракрасной техники. — М.: Наука, 1965.
6. Дарвойд Т. Н., Бочкарев Э. П., Лебедева В. Н. и др. Корреляция объемной лучевой прочности монокристаллов КРС-6 с другими оптическими характеристиками // Оптико-механическая промышленность. — 1981. — № 1. — С. 26—28.
7. Васильев А. В., Войцеховский В. В., Плотниченко В. Г. Измерение спектральной зависимости показателя преломления твердотельных материалов в области их высокой прозрачности // Высокочистые вещества. — 1991. — № 3. — С. 39—49.
8. Данилов В. В. Экспериментальное исследование поликристаллических световодов среднего инфракрасного диапазона // Реєстрація, зберігання і обробка даних. — 2001. — Т. 3, № 3. — С. 23—31.