

ТРА

**ТЕХНОЛОГИЯ И
КОНСТРУИРОВАНИЕ В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**



**Седьмая Рамочная Программа
научно-технического
развития ЕС
2007 — 2013**

<http://cordis.europa.eu/fp7>

*«...возможностями научной кооперации с еврофинансированием Украина пока пользуется очень скромно.»
(см. статью «Перспективы украинско-польского сотрудничества в развитии энергoinформационных медицинских технологий»)*

1(73) 2008

E·X·P·O ELECTRONICA



Совместно с
ElectronTech expo

www.expoelectronica.ru

**11-я МЕЖДУНАРОДНАЯ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА
ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

15-18 АПРЕЛЯ\2008

МОСКВА **Крокус Экспо**
МЕЖДУНАРОДНЫЙ ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР

Тел.: +7(812)380 6003
+7(812)380 6007
+7(812)380 6003
+7(812)380 6000
Факс: +7(812)380 6001
E-mail: electron@primexpo.ru

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

Выходит один раз в 2 месяца

Регистрационный номер КВ 13418-2302ПР

Зарегистрирован в ВАК по разделам «Физико-математические науки», «Технические науки»

Реферируется в УРЖ «Джерело» (г. Киев) и в Реферативном журнале ВИНТИ (г. Москва)



Журнал издается при поддержке

ЗАО «Укрналит»,
ОАО «Меридиан» им. С. П. Королёва
(г. Киев),
НПП «Карат» (г. Львов),
ЦКБ «Ритм» (г. Черновцы)

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

По Украине Отделения связи. «Каталог видань України». Индекс 23785.
Подписное агентство «Идея», www.idea.com.ua. Индекс 11146.
Подписное агентство «KSS», www.kss.kiev.ua. Индекс 20363.
По России Отделения связи. Каталог «Газеты и журналы». Индекс 71141.
По Белоруссии Отделения связи. Каталог «Издания стран СНГ». Индекс 71141.

Через редакцию «ТКЭА».

Адрес редакции: Украина, 65044, г. Одесса, а/я 17
E-mail: tkea@optima.com.ua, web-сайт: www.tkea.com.ua,
тел. +38 (048)728-18-50, 728-11-89,
тел./факс 728-49-46.

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

Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корейская.

Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.

Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.

Печ. л. 8,0+1,0. Уч.-изд. л. 11,0. Тираж 600 экз. Заказ № 16.

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К.т.н. В. М. Чмиль

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

УЧРЕДИТЕЛИ

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

Техническая политика

Перспективы украинско-польского сотрудничества в развитии энергоинформационных медицинских технологий. *Яцененко А. Г., Винтман З. Л., Камков В. П., Хвалеба А.*

3

Электронные средства: исследования, разработки

Новое поколение преобразователей «ток—напряжение» для измерения фотосигналов. *Бутенко В. К., Юрьев В. Г., Годованюк В. Н., Докторович И. В., Федотов С. Г.*

6

Компенсация температурного ухода частоты в резонаторных СВЧ-измерителях на основе ГУН. *Дробахин О. О., Заболотный П. И.*

8

Цифровые генераторные преобразователи повышенной чувствительности для систем управления и контроля. *Шакурский В. К., Иванов В. В., Нагаев Д. А.*

13

Зарядочувствительный усилитель. *Старцев В. И., Ямпольский Ю. С.*

16

Микропроцессорные устройства и системы

Построение обобщенной модели операции свертки многорядных кодов при цифровой обработке сигналов. *Нестеренко С. А., Паулин О. Н.*

20

Функциональная микро- и нанoeлектроника

Аномальный фотовольтаический эффект в структуре с барьером Шоттки–Мотта. *Каримов А. В., Ёдгорова Д. М., Саидова Р. А., Гиясова Ф. А.*

27

Спектры фоточувствительности поверхностно-барьерных структур Ni–n-GaAs. *Мелебаев Д., Мелебаева Г. Д., Рудь Ю. В., Рудь В. Ю.*

31

Технологические процессы и оборудование

Получение полуизолирующего кремния для высоковольтных приборов. *Турцевич А. С.*

35

Методы удаления дефектов, возникающих при жидкостном травлении поверхности поликристаллического кремния. *Иванчиков А. Э., Кисель А. М., Медведева А. Б., Плебанович В. И.*

42

Измерительно-вычислительный комплекс СМ-100 для характеристики жидкокристаллических дисплеев. *Сорокин В. М., Зелинский Р. Я., Рыбалочка А. В., Олийник А. С.*

48

Диффузия фосфора с применением твердого планарного источника в производстве интегральных схем. *Шангереева Б. А.*

54

Метрология. Стандартизация

Методика калибровки УФ-радиометров энергетической освещенности. *Докторович И. В., Бутенко В. К., Годованюк В. Н., Фодчук И. М., Юрьев В. Г.*

57

Библиография

Указатель статей, опубликованных в журнале в 2007 г.

62

Новые книги

5, 12, 15, 19, 26, 41, 56, 64

Выставки. Конференции

30, 34, 53, 2-я, 4-я стр. обл.

ЗМІСТ

Технічна політика

Перспективи українсько-польського співробітництва у розвитку енергоінформаційних медичних технологій. *Яцуненко А. Г., Вінтман З. Л., Камков В. П., Хвалеба А. (3)*

Електронні засоби: дослідження, розробки

Нове покоління перетворювачів «струм — напруга» для вимірювання фотосигналів. *Бутенко В. К., Юр'єв В. Г., Годованюк В. М., Докторович І. В., Федотов С. Г. (6)*

Компенсація температурного відходу частоти у резонаторних НВЧ-вимірювачах на основі ГУН. *Дробахін О. О., Заболотний П. І. (8)*

Цифрові генераторні перетворювачі підвищеної чутливості для систем керування та контролю. *Шакурський В. К., Іванов В. В., Нагаєв Д. А. (13)*

Зарядочуттєвий підсилювач. *Старцев В. І., Ямпольський Ю. С. (16)*

Мікропроцесорні пристрої та системи
Побудова узагальненої моделі операції згортки багаторядних кодів при цифровій обробці сигналів. *Нестеренко С. А., Паулін О. Н. (20)*

Функціональна мікро- та нанoeлектроніка

Аномальний фотовольтаїчний ефект у структурі з бар'єром Шотткі–Мотта. *Каримов А. В., Йодгорова Д. М., Саїдова Р. А., Гіасова Ф. А. (27)*

Спектри фоточутливості поверхнево-бар'єрних структур Ni–n–GaAs. *Мелебаєв Д., Мелебаєва Г. Д., Рудь Ю. В., Рудь В. Ю. (31)*

Технологічні процеси та обладнання
Отримання напівізолюючого кремнію для високовольтних приладів. *Турцевич А. С. (35)*

Методи видалення дефектів, що виникають при рідинному травленні поверхні полікристалічного кремнію. *Іванчиков О. Е., Кисель А. М., Медведєва Г. Б., Плебанович В. І. (42)*

Вимірювально-обчислювальний комплекс CM-100 для характеристики рідкокристалічних дисплеїв. *Сорокін В. М., Зелинський Р. Я., Рибалочка А. В., Олійник О. С. (48)*

Дифузія фосфору з використанням твердого планарного джерела у виробництві інтегральних схем. *Шангереева Б. А. (54)*

Метрологія. Стандартизація

Методика калібрування УФ-радіометрів енергетичної освітленості. *Докторович І. В., Бутенко В. К., Годованюк В. М., Фодчук І. М., Юр'єв В. Г. (57)*

CONTENT

Technical politic

Prospects for Ukrainian-Polish cooperation in the development of energoinformational medical technologies. *Yatsunenکو A. G., Vintman Z. L., Kamkov V. P., Chwaleba A. (3)*

Electronic means: investigations, development

The PPTN-02 new-generation current-voltage transducers for measuring of photosignals. *Butenko V. K., Yuryev V. G., Godovaniouk V. M., Doctorovych I. V., Fedotov S. G. (6)*

Compensation of temperature frequency pushing in microwave resonator-meters on the basis VCO. *Drobakhin O. O., Zabolotnyy P. I. (8)*

The producing digital transformer of heightened sensibility for controlling systems. *Shakurskiy V. K., Ivanov V. V., Nagaev D. A. (13)*

Charging the amplifier. *Startsev V. I., Yampolsky Ju. S. (16)*

Microprocessor devices and systems

On generalizing of the model of compressing operation of arithmetic multi-row codes. *Nesterenko S. A., Paulin O. N. (20)*

Functional micro- and nanoelectronics
Abnormal photovoltaic effect in structure with a barrier Shottky–Mott's. *Karimov A. V., Yodgorova D. M., Saidova R. A., Giyasova F. A. (27)*

Photosensitivity spectrums of Ni–n–GaAs surface-barrier structures. *Melebayew D., Melebayewa G. D., Rud Yu. V., Rud V. Yu. (31)*

Technological processes and equipment
Growing of semiinsulating Si for high-voltage devices. *Turtsevich A. S. (35)*

Methods of removal of defects arising at liquid etching of polycrystalline silicon. *Ivanchykou A. E., Kisel A. M., Medvedeva A. B., Plebanovich B. I. (42)*

Display measuring system CM-100 for LCD characterization. *Sorokin V. M., Zelinsky R. Ya., Rybalochka A. V., Olyynyk A. S. (48)*

Phosphorus diffusion with the help of the solid planar source in the manufacturing of the integrated circuit. *Shangereeva B. A. (54)*

Metrology. Standartization

UV irradiance radiometers calibration procedure. *Doctorovich I. V., Butenko V. K., Hodovaniouk V. N., Fodchuk I. M., Yuriev V. G. (57)*

Уважаемый Читатель!
Как Вы знаете, редакция в течение ряда лет вела в журнале специальную рубрику по проблемам и работам в области техники и технологий сверхвысоких частот. Этой рубрики нет в первом номере года, не будет ее и в последующих номерах. Поскольку в декабре 2007 г. на базе упомянутой рубрики был учрежден и зарегистрирован новый международный научно-технический журнал "Техника и приборы СВЧ". К этому приятному событию непосредственное отношение имеет журнал "ТЭКЭА", а значит, и Вы, уважаемый Читатель, с чем мы Вас от души поздравляем.

Учредителями нового журнала стали Министерство промышленности Украины, киевские предприятия ЧИИ "Орион" и ЧІІІІ "Сатурн", Одесский политехнический университет и книжно-журнальное издательство "Политехперіодика", объединившее редакции журналов "ТЭКЭА" и "ТІІІ СВЧ".

В состав редакционной коллегии журнала "Техника и приборы СВЧ" вошли ученые и специалисты Киева, Минска, Москвы, Одессы, Саратова, Севастополя, Симферополя, Харькова и др.

В 2008 году выйдут первые два номера журнала. Подписка на него открывается со второго полугодия (индекс в Каталоге изданий Украины 99584, для неукраинских организаций – подписка пока только через редакцию).

Остается только пожелать журналу "Техника и приборы СВЧ" увлеченных авторов и благодарных читателей, что мы и делаем с большим удовольствием!

Редакция "ТЭКЭА"

А. Г. ЯЦУНЕНКО, З. Л. ВИНТМАН, к. м. н. В. П. КАМКОВ,
проф. А. ХВАЛЕБА

Украина, г. Днепропетровск, Институт технической механики;
Республика Польша, г. Варшава, Военно-техническая академия
E-mail: anatology@ramed.dp.ua, augustyn.chwaleba@wat.edu.pl

Дата поступления в редакцию
16.11 2007 г.

ПЕРСПЕКТИВЫ УКРАИНСКО-ПОЛЬСКОГО СОТРУДНИЧЕСТВА В РАЗВИТИИ ЭНЕРГОИНФОРМАЦИОННЫХ МЕДИЦИНСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Представлена информация об опыте украинско-польского сотрудничества по исследованию и развитию энергоинформационных медицинских неинвазивных технологий при поддержке Евросоюза.

Более чем скудное бюджетное финансирование украинской науки обусловило беспрецедентно низкое падение уровня технического оснащения экспериментальной базы, материального снабжения, оплаты труда и, как следствие, значительное старение и резкое сокращение научных кадров. Приток выпускников вузов в науку практически иссяк: с одной стороны по причине непривлекательной перспективы карьерного роста, с другой — по причине значительно урезанных штатных расписаний бюджетных организаций. Общение действующих ученых свелось к заочному — по переписке, через информационные издания. Многие, особенно периферийные, учреждения не могут оплатить участие своих сотрудников в конференциях, симпозиумах, выставках. Ценнейшие разработки остаются без патентной защиты из-за отсутствия средств на ее оформление и поддержку.

В этих условиях международное сотрудничество, характерное для современной науки, предоставляет множество перспективных возможностей. Западная Европа в течение многих лет практикует активное сотрудничество ученых разных стран в рамках специальных программ Евросоюза и других организаций, поддерживающих развитие науки. Эти программы оказывают не только организационную, но и финансовую помощь. Они стимулируют ученых, осо-

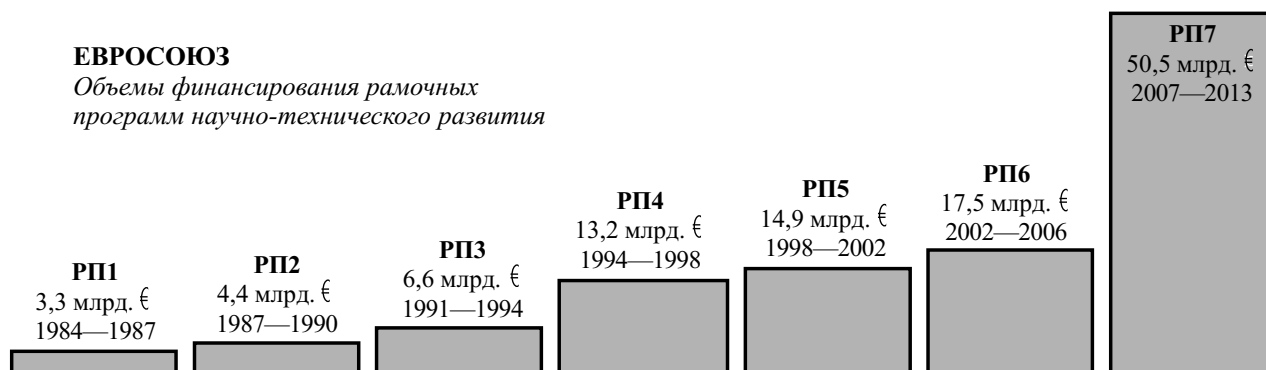
бенно молодых, путем проведения конкурсов, присуждения денежных премий, предоставления возможности обучения в аспирантуре, приглашения на престижную работу и т. п. Образовалась специфическая интернациональная научная среда, где генерация и развитие новых идей обеспечиваются богатой почвой общего интереса партнеров, коллективной материальной базой. Ценность такой общности ученых и государств в ее системности, значительно повышающей суммарную эффективность.

Интеграция украинских ученых в европейские программы не только необходима и возможна, но и происходит практически. Ее успех, как это обычно бывает, определяется инициативой отдельных конкретных личностей при формальной поддержке государства. Так, например, в 2004 году Украиной ратифицировано соглашение с Евросоюзом о научном и технологическом сотрудничестве. Несколько ранее Украина впервые приняла участие в 5-й Рамочной программе (РП) научно-технологического развития Евросоюза (пятилетние РП проводятся с 1984 года), и с тех пор объем ее участия в этих программах неуклонно растет. В 2006 году закончилась РП 6, годовой бюджет которой составлял около 17,5 млрд €, а с 2007 года открыта более продолжительная, чем предыдущие, РП 7 с годовым бюджетом около 50,5 млрд €, которая продлится до 2013 года [1—3].

Вместе с тем возможностями научной кооперации с еврофинансированием Украина пока пользуется очень скромно. При этом около 50% украинского участия в европрограммах приходится на Киев, Одесса участвовала только один раз, Днепропетровск — ни разу... Главная причина неиспользования кооперативных возможностей — это ментальная инерт-

ЕВРОСОЮЗ

Объемы финансирования рамочных программ научно-технологического развития



ность в сборе и осмыслении информации, в подготовке серьезных (а не показательных) документов, отсутствие, наконец, веры в успех. Как показывает жизнь, это можно преодолеть.

На наш взгляд, особенно перспективно научно-техническое сотрудничество Украины с научными организациями Республики Польша. Во-первых, Польша — ближайший западноевропейский сосед Украины, с которым наработан немалый опыт общения во многих сферах деятельности, в том числе научно-технической, а Польша, в свою очередь, имеет опыт сотрудничества со странами Евросоюза и может, помимо всего, играть для Украины роль эффективного посредника. Во-вторых, между нашими странами наиболее низкий языковой и ментальный барьер. Наконец, возможности наших стран взаимодополнительны для создания единой системы, поскольку Украина обладает мощнейшим научно-интеллектуальным потенциалом (множество неиспользуемых изобретений, разработок, идей, невостребованных специалистов высочайшего уровня), а Польша, являясь членом Евросоюза, располагает технико-экономической поддержкой (современно оборудованные лаборатории, финансирование) и, что особенно важно, достаточным количеством молодежи, заинтересованной в обогащении опытом и знаниями.

В программах Евросоюза, поддерживающих исследования и разработки по наиболее важным направлениям, приоритетными, тем не менее, являются оздоровление людей и среды их обитания, производство чистой сельхозпродукции, эффективных и безвредных лекарственных препаратов, медицинская техника и технологии, энергосбережение и альтернативные источники энергии. Работы в перечисленных направлениях частично проводит и Польша, и она готова расширить как объем, так и интенсив-

ность таких исследований. В этом плане развитие украинских медицинских энергоинформационных технологий и востребованность разработанной здесь аппаратуры приобретают новые возможности и перспективы, т. к. оказываются весьма привлекательным объектом приложения творческих усилий, стимулятором прогрессивных достижений.

В Институте технической механики, при инициативе и усилиях специализированного Центра медицинской диагностики и терапии «Рамед», более 15 лет ведутся работы над технологиями и программно-аппаратными средствами, реализующими принципиально новые подходы к использованию возможностей симбиоза древневосточных медицинских принципов, современного европейского понимания и высокотехнологических возможностей радиоэлектроники СВЧ [4]. За это время создана принципиально новая медико-биологическая модель организма человека [5], разработаны теоретические основы, активные элементы, технологии и программно-аппаратные средства для реализации энергоинформационной диагностики и терапии, наработан опыт их практического применения [5—9].

Результаты общего и узкоспециального (для космических, спортивных и иных целей) исследований в этих направлениях вызвали заметный интерес со стороны международной научной общественности. В течение последних двух лет прошли многократные встречи, презентации, обсуждения на различных международных конференциях — СИЭТ (г. Одесса), КрыМиКо и «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (г. Севастополь), Украинские конференции по космическим исследованиям (Национальный космический центр Украины, г. Евпатория), «Миллиметровые волны в медицине и биологии» (г. Москва), а также на форуме «Дни науки и технологий «Польша — Восток» (октябрь 2007, Республика Польша), организованном Евросоюзом. Эти встречи не только показали огромный интерес ближней зарубежной науки к результатам наших исследований и разработок, но и продемонстрировали готовность к широкому сотрудничеству.

В течение полугодия Институтом технической механики совместно с Варшавской Военно-технической академией проведены предварительные эксперименты [10—12], консультации. Прошедшие затем семинары и совещания продемонстрировали серьезный интерес к этим работам и показали перспективность намерений по развертыванию совместных исследований энергоинформационных медицинских технологий и широкому внедрению их в польскую медицинскую практику. Естественным, логичным результатом этой работы стала разработка и оформление долгосрочного украинско-польского проекта, выдержавшего сложную экспертизу. Осуществление проекта предполагается начать с 2008 года. Его пятиступенчатая стратегия предусматривает быстрое развитие исследований путем интенсивного ввода польских специалистов — медиков, биологов, радиофизиков, метрологов и других — в детальную суть украинских разработок.

Десять тематических приоритетов

1	Здоровье 6,1 млрд. евро
2	Продукты питания, с/х, биотехнологии 1,935 млрд. евро
3	Информационные и коммуникационные технологии 9,05 млрд. евро
4	Нанотехнологии, нанонауки Материалы и новые производственные технологии 3,475 млрд. евро
5	Энергетика 2,35 млрд. евро
6	Окружающая среда (вкл. Изменения климата) 1,89 млрд. евро
7	Транспорт (вкл. Аэронавтика) 4,16 млрд. евро
8	Социальноэкономические и гуманитарные науки 623 млн. евро
9	Космос 1,43 млрд. евро
10	Безопасность 1,4 млрд. евро

Ведется подготовка учебной базы и программ с участием Института народной медицины и Медицинской академии (г. Днепропетровск), Львовского медицинского университета и его Трускавецкого лечебно-курортного базового филиала. Планируемая учебно-информационная программа включает элементы интенсификации для ознакомления более широкого круга польских участников проекта с возможностями новых информационных диагностических и лечебных технологий, а также с перспективами научного и карьерного роста. Это позволит отобрать наиболее заинтересованных и способных кандидатов в совместную исследовательскую группу. Такая группа, после углубленного изучения теоретических основ, наработанного украинской стороной опыта и приобретения базовых навыков практической диагностики и лечебной работы, окажется готовой к осуществлению планов совместных исследований и работ.

Заключительный этап проекта завершается формированием комплекса долгосрочных целей как фундамента устойчиво саморазвивающегося направления. Дальнейшие результаты, достигнутые совместными усилиями международной исследовательской группы, приобретенный опыт сотрудничества позволят выделить небольшому лидирующему коллективу, основной задачей которого будет формирование целей более высоких уровней, разработка новых перспективных проектов и координация совместных работ.

Такой системный подход, проработанный методически, организационно и технически в духе времени, позволит, как мы надеемся, не только результативно сотрудничать, но и привлечь внимание практической медицины, биологии, агротехники и Польши, и других стран. Он окажется полезным и для дальнейшего развития польской микроэлектроники, физики и техники полупроводников, полупроводникового материаловедения, нанотехнологий, а также радиотехники связи, телеметрии и коммуникаций. С другой стороны, совместные усилия и помощь Евросоюза смогут поддержать и несколько приподнять тонус украинской науки в перечислен-

ных направлениях, укрепить ее материальную базу, усилить и омолодить людские ресурсы.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. www.cordis.lu/fp7
2. www.europa.eu.int/comm/research/future
3. www.fp6-nip.kiev.ua
4. Винтман З. Л., Яцуненко А. Г., Гринюк В. А., Усенко В. С. Перспективы медицинских технологий, использующих электромагнитные волны КВЧ // Труды 7-й МНПК «Современные информационные и электронные технологии». Т. II. — Одесса, Украина. — 2006. — С. 193.
5. Пилипенко О. В., Яцуненко А. Г., Гринюк В. А., Камков В. П. Пунктурная электрографическая экспресс-диагностика функционального состояния организма человека. — Днепропетровск: ИТМ НАНУ и НКАУ, 2007.
6. Пилипенко О. В., Яцуненко А. Г., Гринюк В. А., Камков В. П. Биорезонансная информационно-пунктурная терапия с использованием электромагнитных волн. — Днепропетровск: ИТМ НАНУ и НКАУ, 2007.
7. Яцуненко А. Г., Винтман З. Л., Джевинский В. П., Усенко В. С. Сверхлегкие генераторные модули для КВЧ-терапии // Технологии и конструирование в электронной аппаратуре (ТКЭА). — 2006. — № 5. — С. 23—24.
8. Яцуненко А. Г., Гринюк В. А., Камков В. П., Винтман З. Л. Лечебно-диагностический комплекс с использованием электромагнитных излучений КВЧ-диапазона // Праці 12-ї Міжнар. конф. «Інформтерapia: теоретичні аспекти та практичне застосування». — Київ, Україна. — 2006. — С. 34—36.
9. Яцуненко А. Г. Принципиально новый подход к изготовлению СВЧ-элементов и узлов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре (ТКЭА). — 2005. — № 5. — С. 10—12.
10. Chwaleba A., Podciechowski M., Yatsunenko A. G., Yatsunenko S. A. Aparatura diagnostyczno-terapeutyczna z wykorzystaniem pol elektromagnetycznych o bardzo wielkiej czestotliwosci i subniskim poziomie mocy // Biuletyn WAT. (Warszawa.) — 2007. — Vol. LVI, № 1. — P. 245—253.
11. Хвалеба А., Яцуненко А. Г., Камков В. П., Красовская А. Г. Возможности использования электромагнитного излучения миллиметрового диапазона для коррекции состояния организма человека // Труды 8-й МНПК «Современные информационные и электронные технологии». — Одесса, Украина. — 2007. — С. 402.
12. Абрамов В. В., Хвалеба А., Яцуненко А. Г., Камков В. П. Применение компьютерной диагностики состояния человеческого организма для мониторинга функциональной готовности спортсменов // Там же. — С. 401.

НОВЫЕ КНИГИ

Медведев А. Сборка и монтаж электронных устройств. — М.: Техносфера, 2007. — 256 с.

Производство электронной аппаратуры неуклонно наращивается, увеличивается плотность компоновки, развиваются технологии поверхностного монтажа. Несмотря на это, в России отсутствуют специализированные издания, посвященные современным проблемам сборки и монтажа.

Предлагаемая книга написана по материалам зарубежной периодической печати, международных конференций и, что особенно ценно, по результатам работы самых высокотехнологичных отечественных предприятий.

Книга посвящена описанию процессов, материалов и оборудования, используемых в сборочно-монтажном производстве, и предназначена для начинающих специалистов в этой области технологий. Надеемся, что опытным специалистам она поможет в обучении персонала, сократив время вхождения в курс дела.



В. К. БУТЕНКО, В. Г. ЮРЬЕВ, д. т. н. В. Н. ГОДОВАНЮК,
И. В. ДОКТОРОВИЧ, С. Г. ФЕДОТОВ

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

Дата поступления в редакцию
02.07 2007 г.

НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ «ТОК—НАПРЯЖЕНИЕ» ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ФОТОСИГНАЛОВ

Новое поколение преобразователей «ток—напряжение» имеет малое входное сопротивление ($<10\text{ Ом}$) и обеспечивает измерения темновых и фототоков фотодиодов от $1\cdot 10^{-12}$ до $1\cdot 10^{-3}\text{ А}$.

При измерениях основных фотоэлектрических параметров фотодиодов — таких как темновой ток (I_T), чувствительность ($S_{\text{инт}}, S_{\text{ил}}$), динамический диапазон чувствительности (d) и др., согласно требованиям [1], сопротивление нагрузки в цепи фотодиода (ФД) выбирается значительно меньшим собственного сопротивления ФД ($R_n \ll R_{\text{фд}}$). Для измерений перечисленных параметров используются нестандартные средства измерений, в состав которых входят контактирующие устройства, блоки выбора резисторов нагрузки, разнообразные предусилители, источники излучения, а также стандартизованное серийное оборудование.

Так, для измерений выходного сигнала с ФД используются: универсальные вольтметры — В7-21А, -23, -30, -34А, -40 и т. д., микровольтметры — В3-38, -39, -47, У2-8, осциллографы — С1-68, -64, -114, С8-13. Однако каждый из них имеет определенные ограничения. Например, из-за несогласованности фотоприемника и измерительного тракта на краях поддиапазонов универсальных вольтметров В7-21А, -30, -40 возрастает погрешность измерений. Кроме того, из-за высокой чувствительности к электромагнитным полям (В7-30) усложняются измерения фотосигналов (фототоков) во всем диапазоне изменения входных оптических сигналов. Некоторые вольтметры (В7-23, -34А) не имеют режима измерения тока, другие (В3-38, -39, -47, У2-8) чувствительны только к модулированным сигналам, часть средств измерений не обеспечивают заданного уровня погрешности измерений (осциллографы) и т. д.

При измерениях немодулированных фотосигналов неплохим согласующим элементом между фотоприемником и измерительным прибором является преобразователь «ток—напряжение» АДБ7.0243.00 и ППТН-01 [2], которые имеют высокий уровень технических характеристик, но являются лишь промежуточным звеном в установках для измерений параметров фотоприемника; для измерения самой величины фотосигнала необходимо применять вольтметр постоянного тока. Кроме этого, часто возникает по-

требность в измерениях токов, меньших пороговой чувствительности АДБ7.0243.00 и ППТН-01.

Разработанный преобразователь «ток—напряжение» ППТН-02 построен на современной отечественной и зарубежной элементной базе, имеет расширенный диапазон преобразования малых уровней тока в напряжение, улучшенные технические характеристики. Он представляет собой малогабаритное измерительное средство, в котором собраны блок питания, предусилитель и вольтметр.

Структурная схема ППТН-02 приведена на рис. 1. При подаче на вход ППТН-02 (Вх.) постоянного тока предусилитель преобразует его в пропорциональное ему напряжение постоянного тока, аналого-цифровой преобразователь преобразует это напряжение в цифровой код, который выводится на индикатор встроенного вольтметра. В случае перегрузки АЦП в старшем разряде цифрового табло вольтметра появляется индикация в виде 1 при отсутствии показаний в остальных разрядах.

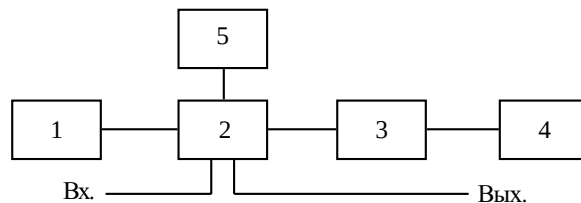


Рис. 1. Структурная схема ППТН-02:

1 — блок питания; 2 — операционный усилитель (ОУ); 3 — аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 4 — жидкокристаллический индикатор (ЖКИ), 5 — переключатель выбора коэффициента преобразования ($K_{\text{пр}}$)

Блок питания, ОУ и вольтметр представляют собой отдельные узлы, которые легко монтируются и заменяются при настройке.

Преобразователь ППТН-02 (см. рис. 2) прост в эксплуатации. Для измерения величины тока на вход ППТН-02 подается сигнал, и по встроенному вольтметру (с учетом необходимой чувствительности) измеряется напряжение.

Измеряемый ток рассчитывается по формуле

$$I = \frac{U}{K_{\text{пр}}}, \quad (1)$$

где I — входной ток, А;

U — напряжение, В;

$K_{\text{пр}}$ — коэффициент преобразования ППТН-02, В/А.

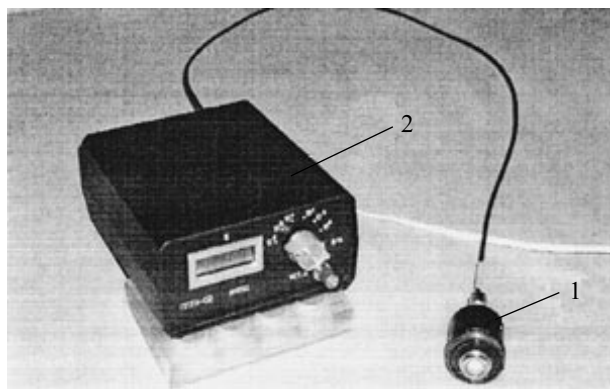


Рис. 2. Радиометрическая головка 1 (генератор тока), подключенная на вход 2 преобразователя «ток—напряжение» ППТН-02

Для более точных измерений напряжения в ППТН-02 предусмотрен дополнительный выход (Вых.) для подсоединения ППТН-02 к внешнему цифровому вольтметру.

Для определения основной относительной погрешности (δ_k) проведены измерения относительной погрешности (δ), нестабильности коэффициента преобразования (δ_n), нелинейности коэффициента преобразования (δ_n) и погрешности встроенного вольтметра (δ_v).

Измерения проводились на установке, структурная схема которой приведена на рис. 3. Токозадающие резисторы с номинальным сопротивлением 10 кОм и 10 МОм (далее $R_{Г1}$) последовательно соединяются с блоком питания и входом ППТН-02; фактические значения их измеряются при помощи цифрового вольтметра В7-34А с точностью не меньше четырех значащих цифр.

Коэффициент преобразования ($K_{пр1}$) определялся по формуле

$$K_{пр1} = \frac{U_1' R_{Г1}}{U_1}, \quad (2)$$

где U_1 , U_1' и $R_{Г1}$ — измеренные значения напряжения и сопротивления.

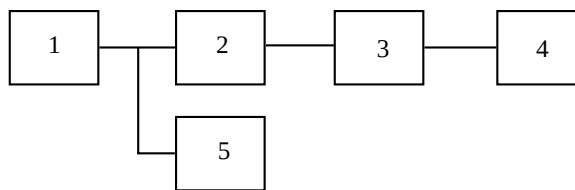


Рис. 3. Структурная схема измерительной установки: 1 — блок питания Б5-43 (Б5-44); 2 — токозадающий резистор; 3 — ППТН-02; 4, 5 — вольтметр цифровой В7-34А (В7-28)

Относительную погрешность коэффициента преобразования (δ_1) определяли по формуле

$$\delta_1 = \left(1 - \frac{K_{пр1}}{K_{пр}} \right) \times 100\%, \quad (3)$$

где $K_{пр}$ — номинальное значение коэффициента преобразования.

Меняя напряжение на блоке питания и резисторе $R_{Г1}$, определяли величину коэффициента преобразования ($K_{пр}$) и относительную погрешность (δ) преобразователя ППТН-02 в каждом диапазоне. Типичные значения относительной погрешности, коэффициента преобразования и другие метрологические и технические характеристики ППТН-02 приведены в таблице.

По результатам измерений коэффициента преобразования ППТН-02 во всем диапазоне в качестве нелинейности (δ_n) приняли максимальное из значений δ .

Нестабильность коэффициента преобразования (δ_n) определялась как отношение максимального отклонения значения коэффициента преобразования от среднего его значения на протяжении 8 часов непрерывной работы:

$$\delta_n = \frac{|K_{\max(\min)} - K_{ср}|}{K_{ср}} \times 100\%, \quad (4)$$

где $K_{\max(\min)}$ — максимальное (минимальное) значение коэффициента преобразования из всех значений $K_{пр}$; $K_{ср}$ — среднее значение коэффициента преобразования.

Метрологические и технические характеристики преобразователей «ток—напряжение»

Характеристика	Преобразователи «ток—напряжение»		
	АДБ7.0243.00	ППТН-01	ППТН-02
Диапазон изменения коэффициента преобразования, $K_{пр}$, В/А	$10^2—10^8$	$10^2—10^8$	$10^4—10^9$
Диапазон токов, преобразуемых в напряжение, А	$10^{-11}—10^{-2}$	$10^{-11}—10^{-2}$	$10^{-12}—2 \cdot 10^{-4}$
Минимальный входной ток, $I_{\min}$, пА	10	10	1,0
Основная относительная погрешность, δ_k , %:	—	—	1,5
			1,0
Относительная погрешность, δ , %	1,0	1,0	0,3
Нестабильность коэффициента преобразования, δ_n , %	1,0	1,0	0,3
Нелинейность коэффициента преобразования, δ_n , %	1,0	1,0	0,3
Погрешность встроенного вольтметра, δ_v , %	—	—	1,0
Масса, кг	3,5	2,0	1,5
Габаритные размеры, мм	280×250×125	180×150×80	150×200×80
Питание (потребляемая мощность)	220 В, 50 Гц (10 Вт)	220 В, 50 Гц (5 Вт)	220 В, 50 Гц (4 Вт)

При измерениях коэффициента преобразования ППТН-02 на одном из диапазонов преобразователя определялась погрешность встроенного вольтметра. Для этого при помощи внешнего вольтметра (В7-34А) измерялось напряжение на выходе ППТН-02 (U_1) и сравнивалось с напряжением на табло ППТН-02 (U_B). Погрешность вольтметра ППТН-02 (δ_U) определялась по формуле

$$\delta_U = \left(1 - \frac{U_1}{U_B}\right) \times 100\%. \quad (5)$$

Основная относительная погрешность измерений δ_k определялась по формуле [3, с. 89—91; 4]

$$\delta_k = 1,1 \cdot \sqrt{\delta^2 + \delta_t^2 + \delta_n^2 + \delta_U^2}. \quad (6)$$

По результатам, приведенным в таблице, можно сделать вывод, что преобразователь ППТН-02 имеет на порядок меньше минимальный входной ток, он меньше, легче и потребляет меньшую мощность.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. ГОСТ 17772—88. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик.
2. Бутенко В. К., Годованюк В. М., Докторович И. В. Прецизионный перетворювач струм—напруга // Науковий вісник ЧНУ.— Чернівці: 2001.— Вип. 102: Фізика. Електроніка.— С. 84—85.
3. Кассандрова О. Н., Лебедев В. В. Обработка результатов наблюдения.— М.: Наука, 1970.
4. ГОСТ 8.207—76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения.

Д. ф.-м. н. О. О. ДРОБАХИН, П. И. ЗАБОЛОТНЫЙ

Украина, г. Днепропетровск, Институт технической механики
E-mail: drobakhino@mail.ru, mwave@ukr.net

Дата поступления в редакцию
08.07 2007 г.

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

КОМПЕНСАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО УХОДА ЧАСТОТЫ В РЕЗОНАТОРНЫХ СВЧ-ИЗМЕРИТЕЛЯХ НА ОСНОВЕ ГУН

Влияние температурных колебаний на погрешность измерений параметров при применении резонаторных СВЧ-измерителей на основе ГУН может быть минимизировано программным образом.

СВЧ-резонаторы находят применение при построении измерительных схем в составе систем контроля и автоматического управления технологическими процессами производства [1]. Для датчиков, построенных на основе СВЧ-резонаторов, параметрами, несущими информацию об изменении контролируемых величин, являются резонансная частота и добротность СВЧ-резонаторов. Изменение любого из этих параметров под влиянием возмущающего воздействия внешнего контролируемого фактора может быть использовано при построении первичных преобразователей (ПП). Для определения изменения резонансной частоты целесообразно использование генераторов, частота которых управляется напряжением специальной формы (ГУН). Периодическое повторение изменения во времени частоты генератора позволяет получить зависимость изменения резонансной частоты и добротности ПП во времени и тем самым отследить изменение интересующего параметра.

В [2] предложена методика контроля параметров, которая базируется на измерении временных интервалов между резонансными откликами — γ_n (рис. 1), появляющимися при перестройке частоты СВЧ-генератора управляющим напряжением $V_{\text{уп}}^{\text{треугольн}}$ треугольной формы, причем один резонанс наблюдается на восходящей ветви (1), а второй — на нисходящей

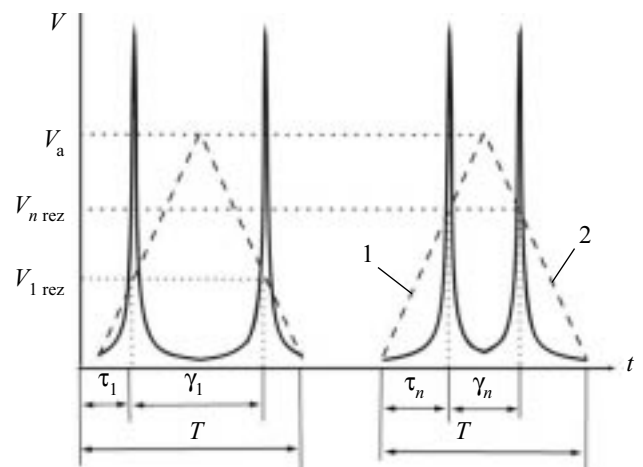


Рис. 1. Сигнал на выходе детекторной секции СВЧ-преобразователя

ветви (2) управляющего напряжения. Поскольку резонансная частота является функцией контролируемых параметров, то и длительность временного интервала между моментами появления резонансных откликов γ_n одного периода перестройки частоты также функционально зависит от контролируемых параметров.

При неизменности контролируемых параметров для всех периодов изменения управляющего напряжения величина временного интервала γ_n остается также неизменной (рис. 1): $\gamma_1 = \gamma_2 = \dots = \gamma_n = \dots$. В случае изменения контролируемых параметров происходит изменение собственных резонансных частот объемного резонатора, что, в свою очередь, вызывает соответствующее изменение значения γ_n .

Следует отметить, что в качестве возмущающего воздействия могут выступать не только контролируемые технологические параметры, но и изменяющиеся условия окружающей среды. Особенно это относится к измерительным устройствам, находящимся в непосредственном контакте с объектом контроля. Одним из основных источников погрешности в системах такого класса является изменение температуры.

Температурная стабильность таких измерительных систем определяется температурной стабильностью рабочей частоты генератора (или полосы рабочих частот) и колебательной системы, включающей резонатор, детекторную систему и другие устройства. Обеспечение температурной стабильности каждого из элементов измерительной системы требует различных технических подходов и представляет собой достаточно сложную техническую задачу [3]. В частности, активное термостатирование СВЧ-генератора [4] реализуется достаточно сложными и громоздкими схемами. Вместе с тем рациональная организация процесса измерений позволяет (именно в случае использования ГУН) программно-управляемым способом вносить в результаты измерений поправки к закону изменения частоты (включая выбор знака поправки) с целью обеспечения компенсации влияния температуры на все элементы измерительной схемы. Современная элементная база позволяет осуществить необходимый процесс программно-управляемым способом при наличии даже одного дополнительного канала измерения температуры ПП.

Целью данной работы является исследование влияния температурных изменений на характер перестройки частоты ГУН и исследование возможностей программного метода интегральной термокомпенсации результатов измерений резонаторного СВЧ-измерителя на этапе окончательной обработки данных.

Данная цель может быть достигнута, если будет построена модель, описывающая интегральную температурную чувствительность ПП, а на этапе калибровки и настройки прибора будут определены значения параметров (коэффициентов) модели для каждого конкретного экземпляра изделия. Полученные значения могут быть введены в программный алгоритм, обеспечивающий температурную компенсацию прибора в процессе его эксплуатации.

Получение соответствия между эталонными величинами контролируемых параметров на входе и значением γ_n на выходе ПП (с учетом оговоренной точности) осуществляется его калибровкой. Калибровка выполняется при условии обеспечения стабильного значения температуры ПП. Отклонение температуры ПП от среднего значения t_m , зафиксированного при калибровке, вызывает дополнительное взаимное смещение резонансных откликов. При этом $\gamma_1 \neq \gamma_2 \neq \dots \neq \gamma_n \neq \dots$

Величина дополнительного температурного смещения $\Delta\gamma_n = \gamma_n - \gamma_{n-1}$ является результатом интегрального воздействия температуры на все элементы первичного СВЧ-преобразователя.

Из рис. 1 видно, что длительность временного интервала от момента появления резонанса на восходящей части треугольного напряжения $V_{n \text{ rez}}$ до момента достижения модулирующим напряжением максимального значения V_a будет определяться как $\gamma_n/2 = T/2 - \tau_n$. Из этого следует, что

$$V_{n \text{ rez}} = V_a(T - \gamma_n)/T, \quad (1)$$

где $V_{n \text{ rez}}$ — напряжение управления ГУН в точке резонанса;
 V_a — амплитуда треугольного напряжения.

Используя последнее выражение и учитывая факт, что смещенной (вследствие ухода температуры) точке резонанса соответствует измененное напряжение управления ГУН, можно получить зависимость между величиной изменения напряжения управления и изменением температуры для любого произвольного периода модуляции:

$$V_{\text{rez}}^{\text{calibr}} - V_{\text{rez}}^t = V_a \left(\frac{T - \gamma_{\text{calibr}}}{T} \right) - V_a \left(\frac{T - \gamma_t}{T} \right); \quad (2)$$

$$\Delta\gamma = \gamma_t - \gamma_{\text{calibr}} = \Delta V_{\text{rez}} T / V_a, \quad (3)$$

где $V_{\text{rez}}^{\text{calibr}}$ — напряжение управления ГУН в точке резонанса при калибровке прибора при эталонной температуре;
 V_{rez}^t — напряжение управления ГУН в точке резонанса при температуре t , отличной от эталонной температуры калибровки;
 γ_{calibr} — длительность временного интервала между точками резонанса на одном периоде T управляющего напряжения, полученная при калибровке;
 γ_t — длительность временного интервала между точками резонанса на одном периоде T , соответствующая текущей температуре t .

Последнее выражение не содержит параметров, зависящих от температуры, и соответственно не позволяет установить связь между $\Delta\gamma$ и изменением температуры ПП.

Используя метод размерностей физических величин, вводим коэффициенты — k_ν , k_t , характеризующие чувствительность частоты ПП к перестройке управляющего напряжения V_{tune} и изменению температуры t , соответственно. Коэффициенты имеют размерность $[k_\nu] = [\text{МГц/В}]$, $[k_t] = [\text{МГц/}^\circ\text{С}]$, и их можно определить при исследовании рабочих характеристик первичного СВЧ-преобразователя.

Для получения значений данных коэффициентов достаточно исследовать частотные характеристики ПП в пределах области возможного изменения температуры и частоты (соответственно и напряжения управления V_{tune}) в процессе эксплуатации.

Исследования рабочих характеристик первичного СВЧ-преобразователя проводились на испытательном стенде. Блок-схема стенда представлена на рис. 2.

Первичный СВЧ-преобразователь, включающий резонатор 4, ГУН 1, ферритовый вентиль 3 и детекторную секцию 6, был помещен в термокамеру 8 с блоком управления и контроля температуры. Управление напряжением питания и модулирующим напряжением для ГУН осуществлялось с помощью источника напряжения 2. Для контроля температуры ПП использовался термодатчик 5. Определение

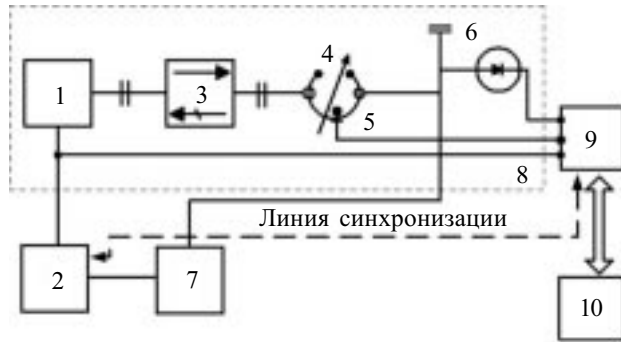


Рис. 2. Блок-схема испытательного стенда:
1 — ГУН; 2 — источник напряжения; 3 — ферритовый вентиль; 4 — измерительный объемный СВЧ-резонатор; 5 — термодатчик; 6 — детекторная секция; 7 — электронно-счетный СВЧ-частотомер; 8 — термокамера с блоком управления и контроля температуры; 9 — АЦП; 10 — микропроцессорный вычислительный блок

текущих абсолютных значений частоты ГУН при фиксированных значениях V_{tune} и температуры выполнялось с помощью электронно-счетного СВЧ-частотомера 7. Вычисление длительности временных интервалов и взаимная синхронизация всех контролируемых сигналов осуществлялась с помощью микропроцессорного вычислительного блока 10 через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 9.

Исследования рабочих характеристик проводились на первичных преобразователях измерителей параметров виброперемещения, изготовленных с применением генераторных блоков на основе микросхем производства WJ Communications, Inc. На рис. 3 представлены зависимости коэффициента частотной чувствительности k_V от напряжения V_{tune} для ПП с полосой перестройки частоты ГУН 680—1200 МГц при различных значениях температуры.

Из представленных графиков видно, что для ПП существует область 2 изменения V_{tune} , внутри которой кривые, отражающие зависимость $k_V(V_{\text{tune}})$ для различных температур, совпадают. Максимальное отклонение k_V от среднего значения при одинаковых значениях V_{tune} и различных температурах внутри этой области не превышает 0,1413 МГц/В (0,66%). Данное отклонение k_V при контроле виброперемещений соответствует 0,01 мм абсолютной погрешности измерений.

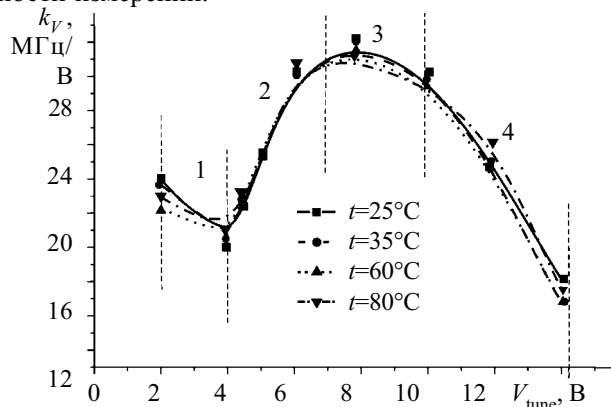


Рис. 3. Зависимость коэффициента k_V от напряжения управления ГУН при различных значениях температуры

Максимальное отклонение k_V от средних значений в других диапазонах изменения V_{tune} составляло более 3,5%. Данный факт подтверждает и представленная на рис. 4 зависимость коэффициента k_V от температуры для различных диапазонов изменения V_{tune} . В частности, для области 2, соответствующей диапазону изменения $V_{\text{tune}}=4...6$ В, наблюдается минимальное изменение k_V при изменении температуры (прямая 2).

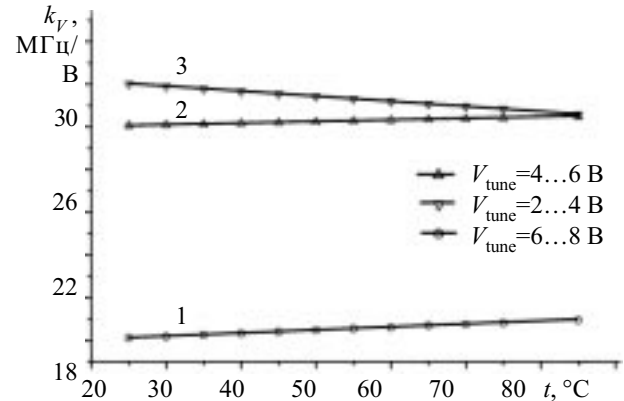


Рис. 4. Зависимость коэффициента k_V от температуры для различных диапазонов изменения V_{tune}

Кроме того, из рис. 3 видно, что в пределах области 2 есть участок ($V_{\text{tune}}=4,2...6,6$ В), на котором зависимость $k_V(V_{\text{tune}})$ можно аппроксимировать линейной зависимостью вида

$$k_V = a + bV_{\text{tune}}, \quad (4)$$

где a, b — коэффициенты линейной аппроксимации.

Изменяя геометрические размеры объемного резонатора, можно совместить рабочую область изменения резонансных частот с областью линейного поведения зависимости $k_V(V_{\text{tune}})$.

Проведенные нами аналогичные исследования свойств ПП с другими типами ГУН (работающих в других частотных диапазонах) позволяют сделать вывод, что практически всегда путем изменения геометрических размеров резонатора можно найти такие диапазоны изменения V_{tune} , внутри которых зависимость k_V хорошо аппроксимируется прямой линией. В этих случаях для ΔF — величины смещения резонансной частоты ПП от изменения напряжения управления ΔV_{tune} — можно записать:

$$\Delta F_V = k_V \cdot \Delta V_{\text{tune}}, \quad (5)$$

где ΔV_{tune} — изменение напряжения управления ГУН внутри области с линейным характером зависимости $k_V(V_{\text{tune}})$.

Значения коэффициента частотной чувствительности k_V были получены в результате исследования уходов частоты ПП при неизменяемых значениях V_{tune} . Было установлено, что существует несколько диапазонов изменения V_{tune} , внутри которых величина k_V изменяется незначительно. В частности, среднеквадратичное отклонение значений от среднего значения k_V , полученных при $V_{\text{tune}}=2,2$ В и $V_{\text{tune}}=3,6$ В, не превышало 0,01 МГц/°C (0,17%).

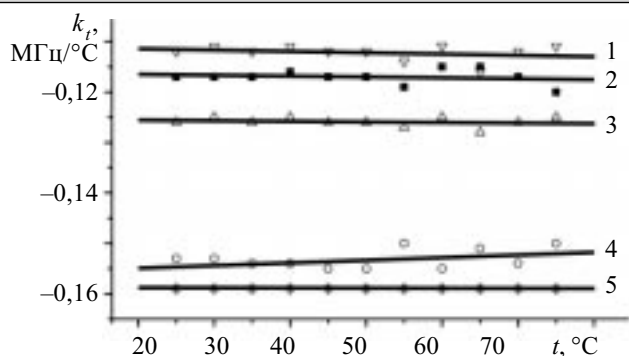


Рис. 5. Зависимость коэффициента температурной чувствительности преобразователя от напряжения управления частотой:

1 — $V_{\text{tune}}=6,7 \dots 8,2$ В; 2 — $1,8 \dots 2$ В; 3 — $2,4 \dots 3,4$ В; 4 — $4,0 \dots 6$ В; 5 — $V_{\text{tune}}=8,7 \dots 10$ В

Полученные результаты представлены на рис. 5. Из графика видно, что зависимость k_t от температуры внутри определенных диапазонов изменения V_{tune} также хорошо аппроксимируется линейной зависимостью. При этом величина наибольшего отклонения от аппроксимирующей прямой, полученной методом наименьших квадратов для различных диапазонов изменения V_{tune} , не превышает $0,011$ МГц/°С ($0,05\%$).

Представленная на рис. 5 зависимость позволяет сделать вывод о том, что и для k_t путем подбора геометрических размеров резонатора ПП можно найти такие диапазоны изменения V_{tune} , внутри которых k_t

будет иметь минимальную чувствительность к изменениям температуры (тангенс угла наклона аппроксимирующих прямых не превышал $0,00023$).

Исходя из этого, смещение частоты резонатора ПП от температуры можно представить в виде следующей зависимости:

$$\Delta F_t = k_t(t - t_m), \quad (6)$$

где t — текущая температура ПП;

t_m — средняя температура, определяемая при калибровке.

Предполагая неизменность параметров резонатора и свойств контролируемой среды, считаем, что смещение частоты резонанса происходит вследствие изменения температуры, что соответственно позволяет принять эквивалентность ΔV_{rez} и ΔV .

Приравнявая выражения (5) и (6), получаем:

$$k_V \cdot \Delta V_{\text{rez}} = k_t(t - t_m); \quad (7)$$

$$\Delta V_{\text{rez}} = k_t(t - t_m) / k_V. \quad (8)$$

Подставляя полученное выражение для ΔV_{rez} в выражение (3), получим значение $\Delta \gamma$ — величины изменения длительности временного интервала между точками резонанса при отклонении температуры генератора от значения t_m :

$$\Delta \gamma = (k_t / k_V)(T / V_a)(t - t_m). \quad (9)$$

С использованием выражения (9) были получены значения поправки к длительности временных интервалов между резонансными пиками на восходящей и нисходящей части модулирующего на-

Абсолютные значения продольных перемещений при различных температурах ПП измерителя вибропереме-

Время, с	Калиб- ровка	С компенсирующей поправкой				Без поправки			
	x , мм	$x(35^\circ\text{C})$, мм	$ \Delta x $, мм	$x(50^\circ\text{C})$, мм	$ \Delta x $, мм	$x(35^\circ\text{C})$, мм	$ \Delta x $, мм	$x(50^\circ\text{C})$, мм	$ \Delta x $, мм
0	-5,50	-5,53	0,03	-5,47	0,03	-6,13	0,63	-7,68	2,18
0,04	-4,50	-4,52	0,02	-4,49	0,01	-4,93	0,43	-6,35	1,85
0,08	-3,50	-3,52	0,02	-3,44	0,06	-3,86	0,36	-5,17	1,67
0,1	-3,00	-3,02	0,02	-3,00	0,00	-3,33	0,33	-4,58	1,58
0,14	-2,00	-2,02	0,02	-2,00	0,00	-2,28	0,28	-3,43	1,43
0,16	-1,50	-1,51	0,01	-1,49	0,01	-1,80	0,30	-2,90	1,40
0,2	-0,50	-0,51	0,01	-0,49	0,01	-0,88	0,38	-1,90	1,40
0,24	0,50	0,51	0,01	0,50	0,00	0,16	0,34	-0,76	1,26
0,28	1,50	1,52	0,02	1,49	0,01	1,17	0,33	0,32	1,18
0,3	2,00	2,02	0,02	2,04	0,04	1,63	0,37	0,81	1,19
0,36	3,50	3,54	0,04	3,51	0,01	3,04	0,46	2,28	1,22
0,38	4,00	4,04	0,04	4,05	0,05	3,52	0,48	2,77	1,23
0,4	4,50	4,52	0,02	4,59	0,09	3,97	0,53	3,22	1,28
0,44	5,50	5,53	0,03	5,56	0,06	4,97	0,53	4,2	1,3
0,48	6,50	6,53	0,03	6,48	0,02	5,98	0,52	5,18	1,32
0,5	7,00	7,04	0,04	6,94	0,06	6,44	0,56	5,62	1,38
0,52	7,50	7,54	0,04	7,44	0,06	6,75	0,75	5,91	1,59
0,54	8,00	8,04	0,04	8,05	0,05	7,13	0,87	6,26	1,74
0,56	8,50	8,54	0,04	8,48	0,02	7,48	1,02	6,59	1,91
0,58	9,00	9,05	0,05	9,05	0,05	7,87	1,13	6,95	2,05
Среднее отклонение			0,028		0,032		0,530		1,508

пряжения в процессе работы ПП измерителя виброперемещений в условиях с нестабильной температурой. В **таблице** представлены результаты измерений абсолютных значений продольных перемещений при различных температурах ПП, полученные с учетом температурной компенсирующей поправки и без нее.

Из таблицы видно, что среднее отклонение величины перемещения контролируемого объекта от значения перемещения, полученного при калибровке, для ПП с учетом температурной компенсации не превышает 0,032 мм (0,152%). Для случая без температурной компенсации это отклонение существенно зависит от температуры, и значение его тем больше, чем больше величина отклонения температуры от температуры при калибровке t_m .

Таким образом, как показано в работе, влияние температурных колебаний на погрешность измерений параметров первичными преобразователями на

основе объемных резонаторов может быть минимизировано программным образом за счет предложенного специального алгоритма коррекции смещения значения интервала частоты генерации генератора, управляемого напряжением.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Викторов В. А., Лункин Б. В., Совлуков А. С. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Пилипенко О. В., Заболотний П. І, Запольський Л. Г. НВЧ-щуп для локальних вимірювачів параметрів вібрацій з низькою частотою // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. (НУ «Львівська політехніка»). — 2006. — Вип. 40. — С. 177—183.
3. Кривоносов Л. И. Температурная компенсация электронных схем. — М.: Связь, 1977.
4. Кравченко А. В., Плаксин С. В., Соколовский И. И. Активное термостатирование полупроводниковых СВЧ-генераторов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре (ТКЭА). — 2005. — № 3. — С. 63—64.

НОВЫЕ КНИГИ

Радиоэлектронные системы: основы построения и теория / Под ред. Я. Д. Ширмана. — М.: Радиотехника, 2007. — 512 с.

Рассмотрены основы построения, общие вопросы оптимизации и теория радиоэлектронных систем локации, навигации, передачи информации, управления, радиоэлектронной борьбы, а также вопросы распространения волн и элементы общей системотехники. По сравнению с первым изданием материал существенно переработан и дополнен с учетом последних мировых достижений и научных результатов авторов. Для специалистов, преподавателей и студентов вузов, специализирующихся в области локационной и навигационной системотехники, общей радиотехники и радиофизики.

Кёниг Анна. Полное руководство по PIC-микроконтроллерам. — М.: МК-Пресс, 2007. — 256 с.

На основании своего многолетнего опыта разработки проектов с использованием микроконтроллеров PIC авторы рассматривают данную тему с точки зрения конструкторов-практиков. Затрагиваются все вопросы, связанные с периферийными устройствами, для взаимодействия с которыми, собственно, и предназначены микроконтроллеры. В частности, описаны аналоговые периферийные модули, инструментальная среда MPLAB, а также отладчик и демонстрационные платы. Книга рассчитана на тех, кто уже имеет опыт работы с микроконтроллерами PIC. Основной акцент в ней сделан на разработках последних лет, к которым, в первую очередь, относится серия микроконтроллеров PIC18. Кроме того, в книге рассказано о многих нововведениях в микроконтроллерах PIC с 14- и 12-рядным ядром. В комплект входит CD.

Ушаков В. Н. Акустооптические процессоры корреляционного типа. — М.: Радиотехника, 2007. — 184 с.

Рассмотрены акустооптические сигнальные процессоры корреляционного типа, являющиеся перспективным классом устройств функциональной электроники, существенно расширяющим возможности современных средств обработки сигналов. Предложены оригинальные структуры видео- и радиочастотных акустооптических корреляторов с временным и пространственным интегрированием, теоретически и экспериментально обоснована их работоспособность и установлены предельно достижимые значения основных параметров данного класса устройств.



Д. т. н. В. К. ШАКУРСКИЙ, д. т. н. В. В. ИВАНОВ,
Д. А. НАГАЕВ

Россия, Тольяттинский гос. университет, Тольяттинский
гос. университет сервиса
E-mail: Shakurskiy@mail.ru

Дата поступления в редакцию
29.10 2007 г.

Оппонент к. ф.-м. н. И. И. СОКОЛОВСКИЙ
(Ин-т «Трансмаг», г. Днепропетровск)

ЦИФРОВЫЕ ГЕНЕРАТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОВЫШЕННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ

Рассматривается реализация режима сверхчувствительности в цифровых автоколебательных системах с целью синтеза цифровых генераторных преобразователей повышенной чувствительности.

Одной из проблем, решаемых исследователями и разработчиками генераторных преобразователей и модуляторов с выходным ЧМ- или ФМ-сигналом, является увеличение их чувствительности к управляющему параметру.

Частота генерируемого сигнала в основном определяется нулевой точкой эквивалентной фазочастотной характеристики (ФЧХ) разомкнутой цепи автоколебательной системы при условии выполнения баланса амплитуд. Во всех широко известных структурах квазигармонических автоколебательных систем чувствительность нулевой точки ФЧХ к управляющему параметру имеет потенциальные ограничения. Авторами [1] был выявлен новый эффект, позволяющий реализовать чувствительность, которая в десятки и сотни раз может превышать указанные потенциальные значения. Данный эффект был назван эффектом сверхчувствительности автоколебательных систем. Эффект реализуется введением в автоколебательную систему дополнительного фильтра с инвертированным наклоном ФЧХ по отношению к типичному наклону.

Эффект объясняется следующим. При вычитании двух типичных ФЧХ с близким друг к другу наклоном и смещенных относительно друг друга, нулевая точка эквивалентной ФЧХ может находиться далеко от области частот, ограниченной нулевыми точками вычитаемых ФЧХ. При сложении типичных ФЧХ нулевая точка эквивалентной ФЧХ всегда находится в области частот, ограниченной нулевыми точками суммируемых ФЧХ [1, с. 15].

Для инвертирования ФЧХ разработана двухканальная структура [1, с. 28]. Выполненные исследования показали, что эффект сверхчувствительности реализуется в любой автоколебательной системе указанного класса. Условием устойчивой работы автоколебательной системы в режиме сверхчувствительности является типичный наклон эквивалентной ФЧХ разомкнутой цепи [2, 3]. На базе указанного эффекта разработаны генераторные аналоговые параметрические преобразователи повышенной чув-

ствительности с выходным ЧМ- и ФМ-сигналом, преобразователи девиации частоты и девиации фазы, модуляторы [1, 4].

Недостатком аналоговых преобразователей в режиме повышенной чувствительности является возрастание дополнительной погрешности при воздействии дестабилизирующих факторов. Избавиться от этого недостатка можно реализацией режима сверхчувствительности в цифровых автоколебательных системах. В цифровых генераторных преобразователях дополнительная погрешность равна нулю, но возникают другие проблемы, которые требуют проведения исследований. Это ступенчатость ФЧХ, проблема управления цифровой автоколебательной системой, проблема настройки заданной крутизны преобразования и другие.

Целью статьи является определение особенностей синтеза цифровых управляемых автоколебательных систем в режиме сверхчувствительности.

Рассмотрим реализацию цифровой автоколебательной системы с однопетлевой обратной связью в режиме сверхчувствительности, структура которой приведена на **рис. 1**. Система содержит полосный фильтр 1 с инвертированным наклоном ФЧХ, усилитель 2, нелинейный блок 3 и полосный фильтр 4 с типичной ФЧХ.

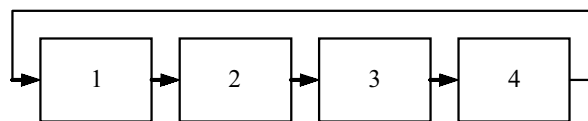


Рис. 1

Исследования автоколебательной системы проводились в среде Simulink математической системы MATLAB. Была разработана модель цифровой автоколебательной системы, которая приведена на **рис. 2**.

Модель фильтра с инвертированным наклоном ФЧХ приведена на **рис. 3**. Использовались цифровые полосные фильтры с конечной импульсной характеристикой (КИХ), т. к. они обладают линейными ФЧХ, что необходимо для получения линейных характеристик разрабатываемых преобразователей.

Наличие в модели фильтра с инвертированным наклоном ФЧХ смесителей приводит к жесткому возбуждению автоколебательной системы. Это потребовало введения блока раскачки (см. рис. 2). Для снятия характеристик используется частотомер и осциллограф. В обратную связь введен блок варьи-

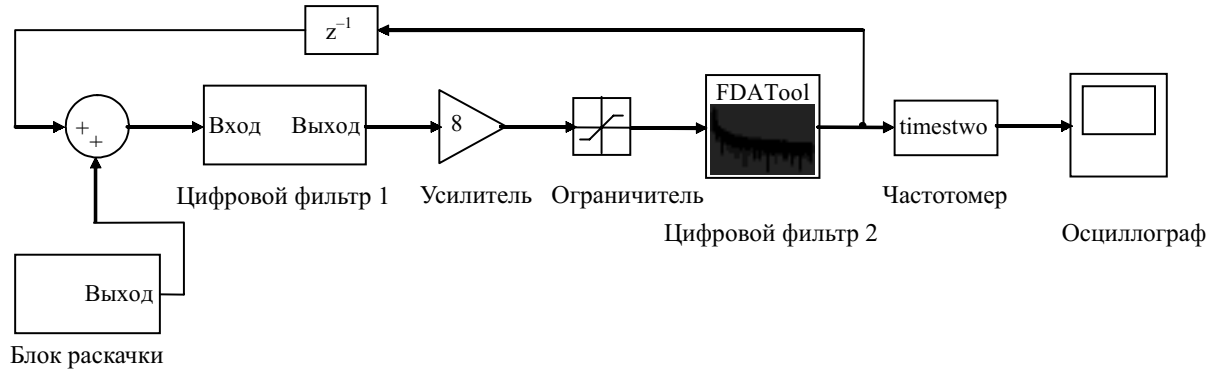


Рис. 2

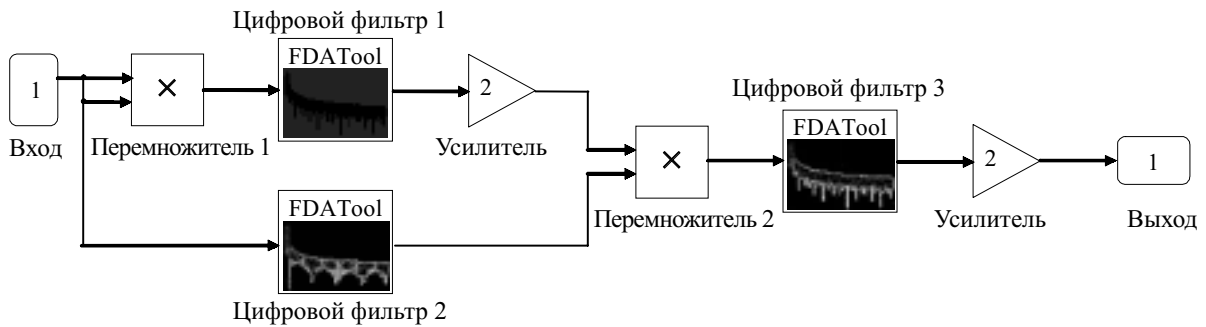


Рис. 3

руемой задержки, с помощью которого имитируется управление частотой генерируемого сигнала изменением величины вносимого фазового сдвига.

Модель фильтра с инвертированным наклоном ФЧХ строится по двухканальной схеме. Второй канал работает на удвоенной частоте входного сигнала. Для этого используется перемножитель 1. С помощью перемножителя 2 и фильтра 3 выделяется сигнал с основной частотой. Если фазовый сдвиг в фильтрах 1 и 3, то результирующий фазовый сдвиг в данной модели фильтра меняет знак по сравнению с типичным фильтром. Вариацией наклонов ФЧХ фильтров 1, 2 и 3 можно получить эквивалентную ФЧХ с типичным наклоном, с нулевым наклоном и с инвертированным наклоном.

Определим возможные частоты генерируемых колебаний. Уравнение баланса фаз для структуры автоколебательной системы рис. 2 имеет вид

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_{\text{вн}} = -2\pi n, \quad (1)$$

где φ_1, φ_2 — фазовые сдвиги в фильтрах;
 $\varphi_{\text{вн}}$ — вносимый фазовый сдвиг;
 $n = 1, 2, 3, \dots$

Используем выражение для ФЧХ цифрового КИХ-фильтра

$$\varphi(f) = -\frac{\pi R}{F_d} f,$$

где R — порядок фильтра;
 F_d — частота дискретизации.

Запишем также выражение для ФЧХ блока задержки

$$\varphi(f) = -\frac{2\pi r}{F_d} f,$$

где r — количество интервалов между выборками, на время которых происходит задержка ($r \geq 1$).

Подставим их в (1) и получим выражение для частоты генерируемых сигналов:

$$f = \frac{n}{\frac{R_1}{F_{d1}} - \frac{R_2}{2F_{d2}} + \frac{R_3}{2F_{d3}} + \frac{R_4}{2F_{d4}} + \frac{r}{F_{d5}}}. \quad (2)$$

Условием устойчивости колебаний является положительный знак знаменателя (2). Для увеличения чувствительности необходимо минимизировать знаменатель.

Выполненные исследования компьютерной цифровой модели показали, что порядок фильтров (количество выборок КИХ) и частоту дискретизации следует использовать для настройки автоколебательной системы. При этом полоса фильтра определяется отношением частоты дискретизации к порядку фильтра. С учетом ступенчатого характера ФЧХ увеличение разрешающей способности в полосе фильтра требует увеличения частоты дискретизации и соответствующего увеличения порядка фильтров.

Наиболее эффективным способом управления частотой генерируемого сигнала является внесение в цепь обратной связи автоколебательной системы варьированного частотонезависимого фазового сдвига. Управляющий фазовращатель может быть вне процессора, реализующего автоколебательную систему.

Вводя в уравнение баланса фаз управляемый фазовый сдвиг фазовращателя $\pm\varphi(x)$, получим выражение для характеристики преобразования фазового сдвига в частоту генерируемого сигнала:

$$f(x) = \frac{n \pm \frac{\varphi(x)}{2\pi}}{\frac{R_1}{F_{d1}} - \frac{R_2}{2F_{d2}} + \frac{R_3}{2F_{d3}} + \frac{R_4}{2F_{d4}} + \frac{r}{F_{d5}}} \quad (3)$$

Выполненные эксперименты на компьютерных моделях подтверждают сделанные выводы. Например, при крутизне эквивалентной ФЧХ фильтра 1 (рис. 1) $S_{\varphi 1} = \pi \cdot 6,75 \cdot 10^{-3}$ и крутизне эквивалентной ФЧХ фильтра 4 $S_{\varphi 2} = \pi \cdot 9 \cdot 10^{-3}$ получена характеристика, приведенная на рис. 4, где фазовый сдвиг — в градусах, а частота — в герцах.

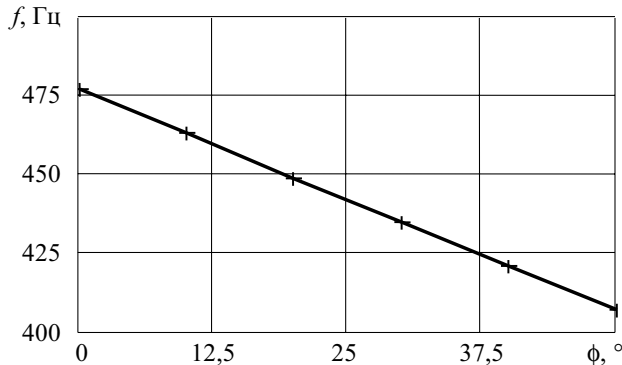


Рис. 4

Характеристика получена варьированием вносимой задержки, величина которой затем пересчитывалась в фазовый сдвиг на частоте генерируемого сигнала. Характеристика имеет ступенчатый характер (на рис. 4 она аппроксимирована линией).

Выполнены аналогичные исследования других цифровых автоколебательных систем в режиме повышенной чувствительности, например с двухпетлевой обратной связью, с комбинационным взаимодействием трех сигналов некротных частот [5, 6].

По результатам исследований можно сделать следующие выводы.

Линейные ФЧХ цифровых фильтров проходят через начало координат, поэтому смещение нулевых точек ФЧХ приводит к одновременному изменению их крутизны и наоборот. Это усложняет про-

цедуру настройки цифровых генераторных преобразователей.

Ступенчатость ФЧХ цифровых фильтров приводит к дискретности характеристики преобразователя. Увеличение чувствительности преобразователя требует увеличения разрешающей способности и должно сопровождаться увеличением порядка фильтров и увеличением частоты дискретизации. Возрастает объем операций на каждом интервале между выборками. В свою очередь это снижает быстродействие и ограничивает диапазон частот генерируемых сигналов.

В структуре цифровой автоколебательной системы в цепи обратной связи необходим элемент задержки как минимум на один интервал между выборками. Это обеспечивает устойчивость автоколебаний.

Наклон эквивалентной ФЧХ автоколебательной системы должен быть типичным. В противном случае возникает эффект частотной неустойчивости. В процессе возбуждения автоколебаний происходит смещение частоты в сторону границы полосы фильтра. Нарушается баланс амплитуд и происходит срыв автоколебаний.

Полученные результаты позволяют говорить о перспективности данного нового класса цифровых генераторных преобразователей.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Иванов В. В., Шакурский В. К. Генераторные, фазовые и частотные преобразователи и модуляторы. — М.: Радио и связь, 2003.
2. Иванов В. В., Шакурский В. К. Эффект преобразования в комбинационном генераторе девиации частоты сигнала синхронизации // Радиотехника. — 2004. — № 4. — С. 37—40.
3. Иванов В. В., Шакурский В. К. Анализ свойств управляемого генератора в режиме повышенной чувствительности // Электросвязь. — 2004. — № 7. — С. 43—51.
4. Иванов В. В., Шакурский В. К. Увеличение чувствительности генераторных параметрических преобразователей // Изв. вузов. Приборостроение. — 2005. — № 7. — С. 47—51.
5. Иванов В. В. Частотно-фазовые преобразователи повышенной чувствительности // Там же. — 2005. — № 9. — С. 13—17.
6. Иванов В. В., Нагаев Д. А. Цифровые генераторные преобразователи сигналов с угловой модуляцией // Изв. Самарского научного центра РАН. — 2006. — Спец. выпуск. — С. 31—34.

НОВЫЕ КНИГИ

Гадзиковский В. И. Методы проектирования цифровых фильтров. — М.: Горячая линия—Телеком, 2007. — 416 с.

Рассмотрены методы математического синтеза одномерных скалярных вещественных нерекурсивных цифровых фильтров (ЦФ) и эвристического синтеза рекурсивных ЦФ. Разработаны алгоритмы синтеза одномерных скалярных комплексных ЦФ (нерекурсивных и рекурсивных). Изложены методики расчёта разрядности коэффициентов и операционных устройств одномерных скалярных и векторных ЦФ, а также требуемого быстродействия вычислителя, что необходимо для выбора элементной базы — сигнального процессора (DSP). Приведены примеры моделирования процессов цифровой фильтрации.

Для научных работников и инженеров, занимающихся проектированием систем цифровой обработки сигналов и цифровым моделированием технических систем, а также для студентов и аспирантов радиотехнических специальностей вузов.



К. т. н. В. И. СТАРЦЕВ, к. т. н. Ю. С. ЯМПОЛЬСКИЙ

Украина, Одесский национальный политехнический университет
E-mail: vist@rtf.ospu.odessa.ua

Дата поступления в редакцию
18.09 2007 г.

Оппонент А. Г. ЯЦУНЕНКО
(Ин-т технической механики, г. Днепрпетровск)

ЗАРЯДОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Рассматриваются способы уменьшения влияния пьроэлектрических токов, вызванных воздействием градиента температуры на пьезоэлектрический датчик, на уровень выходного напряжения зарядочувствительных усилителей.

В диагностике и определении вибронпряженности механизмов — как на стадии доводки, так и на стадии эксплуатации — все более широкое применение находят измерения с помощью вибропреобразователей. Наиболее широко применяются пьезоэлектрические вибропреобразователи [1, 2].

Среди многочисленных факторов, влияющих на результаты измерений параметров вибрации, особое значение имеет изменение температуры окружающей среды в месте размещения вибропреобразователя. Коэффициент преобразования современных пьезоэлектрических вибропреобразователей практически не зависит от температуры, но, как отмечено в ряде работ, изменение температуры по объему вибропреобразователя приводит к появлению паразитных зарядов. Подобные явления носят название пьроэлектричества [3, 4].

Влияние эффекта генерирования паразитных зарядов особенно проявляется при проведении измерений вибрации на низких частотах. Рассмотрим способы устранения этого влияния.

Пьезоэлектрические вибропреобразователи имеют емкостный импеданс и генерируют электрический сигнал мощностью $10^{-12} \dots 10^{-14}$ Вт. Для преобразования заряда в напряжение используются операционные усилители напряжения (ОУ) с большим коэффициентом усиления ($K \gg 1$), охвачен-

ные глубокой параллельной отрицательной обратной связью (ООС) через C_{oc} (рис. 1).

Оба плеча дифференциального усилителя заряда охвачены отрицательной обратной связью через емкости C_{oc} и сопротивления R_{oc} . На положительный вход сигнал по второй цепи C_{oc} и R_{oc} подается через инвертор. Выходное напряжение $U_{вых} = (q_1 - q_2)/C_{oc}$, где q_1 и q_2 — заряды на электродах вибропреобразователя.

Частотная характеристика в области низких частот описывается выражением

$$K(w) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{w_i}{w}\right)^2}},$$

где $w_n = 1/R_{oc}C_{oc}$ — нижняя частота среза усилителя заряда по уровню 0,707 (при заданной чувствительности C_{oc}). Величина нижней граничной частоты при этом определяется величиной R_{oc} .

Постоянный перепад температуры приводит к появлению паразитной пьроэлектрической электризации датчика и медленно меняющегося тока ($I_{пз}$), протекающего на вход зарядочувствительного усилителя. Для датчика АВС-132 величина этого тока равна $I_{пз} \approx 4 \cdot 10^{-10}$ А/°С.

При больших значениях R_{oc} , т. е. при малых значениях нижней граничной частоты усилителя, под

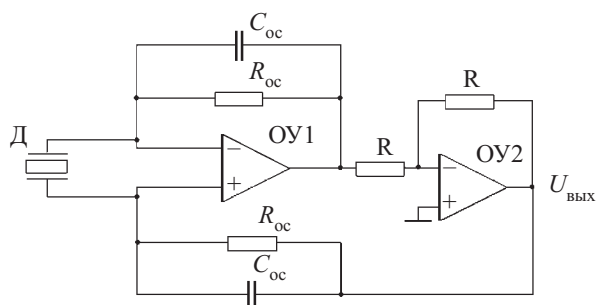


Рис. 1. Симметричный зарядочувствительный усилитель (ЗЧУ) с параллельной ООС

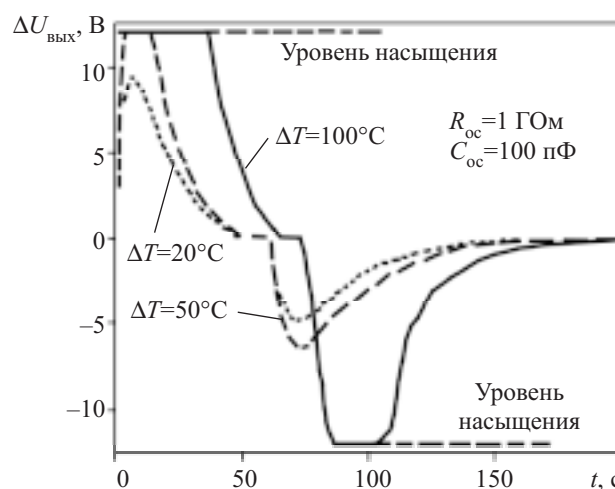


Рис. 2. Изменение уровня выходного напряжения ЗЧУ, вызванное воздействием перепадов температуры на пьезодатчик АВС-132

действием этих токов происходит перегрузка усилителя, и аппаратура может потерять работоспособность на длительное время (см. **рис. 2**, где отражены результаты воздействия перепадов температуры на датчик ABC-132, подключенный к входу зарядочувствительного усилителя).

При этом емкость в цепи обратной связи зарядочувствительного усилителя была выбрана исходя из чувствительности пьезоэлектрического датчика типа ABC-132 ($0,7 \text{ пК}/(\text{м}/\text{с}^2)$), а также из ожидаемого уровня виброускорения $100g$, и равна 100 пФ . Следовательно, максимальная величина напряжения на выходе усилителя не будет превышать 7 В .

Величина резистора в цепи обратной связи была выбрана исходя из требуемого значения нижней граничной частоты ($f_n = 1,5 \text{ Гц}$) и равна 10^9 Ом .

Измерения проводились по методике фирмы Брюль и Кьер [5].

Как видно из приведенных графиков, даже небольшой перепад температуры $\Delta T = \pm 20^\circ\text{C}$ влечет за собой значительное изменение уровня выходного напряжения $\Delta U_{\text{вых}}$. Это приводит к ограничению полезного сигнала и, таким образом, к потере работоспособности усилителя на десятки секунд, а при больших значениях скачка температуры — к потере работоспособности более чем на минуту. Аналогичные результаты были получены при испытании пьезоэлектрического датчика типа 4375 фирмы Брюль и Кьер.

Потеря информации об уровне вибрации (особенно во время переходных процессов в механизмах, когда резко изменяется температура) может привести к пропуску начала развития аварийной ситуации, которую можно было бы предотвратить при нормальной работе контролирующей аппаратуры.

Для устранения такого явления предпринимаются следующие меры.

1. Выбор датчиков с максимальной чувствительностью к изменениям температуры (для разных типов датчиков эта чувствительность может отличаться

в 250 раз — см. **таблицу**). К сожалению, это требование не всегда удается выполнить из-за габаритных, массовых, частотных, температурных или других ограничений [5].

2. Уменьшение влияния температуры с помощью специальных теплоизолирующих покрытий. При внутренних измерениях этот метод может оказаться неприемлемым из-за габаритных ограничений и необходимости обеспечения долговременной механической прочности покрытий в агрессивных средах.

На **рис. 3** отражены результаты воздействия перепадов температуры на датчик ABC-132 с термоизолирующим покрытием. Как видно из графиков, изменение уровня напряжения на выходе усилителя под воздействием перепада температуры стало почти в 3 раза меньше, но при этом процесс возвращения к исходному уровню увеличился во столько же раз. Следует отметить, что и в этом случае наблюдается потеря работоспособности аппаратуры на достаточно большое время.

3. Уменьшение сопротивления резистора в цепи обратной связи (см. **рис. 1**). Действительно, т. к.

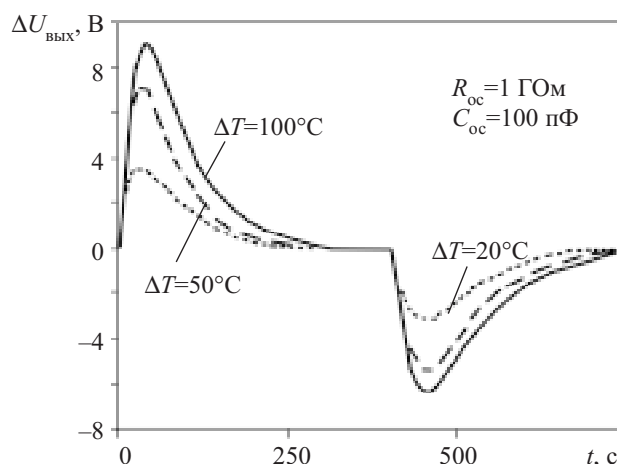


Рис. 3. Изменение уровня выходного напряжения ЗЧУ, вызванное воздействием перепадов температуры на пьезодатчик, покрытый термоизоляцией

Акселерометры пьезоэлектрические Brüel & Kjær 											
		4375 4375V	4393 4393V	4384 4384V	4371 4371V	4391 4391V	4382 4382V	4383 4383V	4370 4370V	4381 4381V	
Масса, г		2,4		11		16		17		54	43
Чувствительность по заряду для Uni-Gain-DeltaShear-типов	пКл/(м·с ⁻²)	0,316±2%		1±2%		1±2%		3,16±2%		10±2%	
	пКл/g	3,1±2%		9,8±2%		9,8±2%		31±2%		98±2%	
Пьезоэлектрический материал		PZ23		PZ23		PZ23		PZ23		PZ23	
Конструкция		DeltaShear		DeltaShear		DeltaShear		DeltaShear		DeltaShear	
Чувствительность к изменениям температуры (номинальное значение НПЧ 3 Гц, 20 дБ/дек	м·с ⁻² /°C	5		0,4		0,2		0,1		0,02	0,04
	g/°F	0,28		0,022		0,011		0,0056		0,0011	0,0022
Диапазон рабочих температур, °C		-74...250		-74...250		-60...180		-74...250		-74...250	
Материал основания		Титан ASTM Gr. 2		Титан ASTM Gr. 2		Титан ASTM Gr. 2		Титан ASTM Gr. 2		Сталь AISI316	Титан ASTM Gr. 2

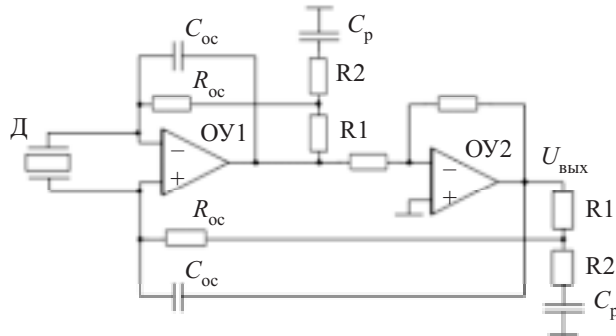


Рис. 4. Схема ЗЧУ с частотно-зависимым делителем в цепи ООС

$U_{\text{вых}} = I_{\text{пз}} R_{\text{oc}} \Delta T$, то уменьшение R_{oc} позволит снизить величину изменения уровня выходного напряжения ЗЧУ под действием паразитного пьезоэлектрического тока, но в этом случае происходит увеличение нижней граничной частоты ЗЧУ

$$f_i = \frac{1}{2\pi R_{\text{oc}} C_{\text{oc}}},$$

что недопустимо, особенно при пусковых режимах работы механизмов.

Использование частотно-зависимого делителя, включенного между выходом усилителя и резистором R_{oc} , позволяет уменьшать сопротивление этого резистора с сохранением полосы пропускания в области низких частот (см. рис. 4).

Коэффициент передачи в этом случае будет иметь вид

$$K = \frac{C_d}{C_{\text{oc}}} \frac{1}{1 + \frac{1 + j\omega\tau_k}{j\omega\alpha \left(\frac{1}{\alpha} + j\omega\tau_k \right)}}$$

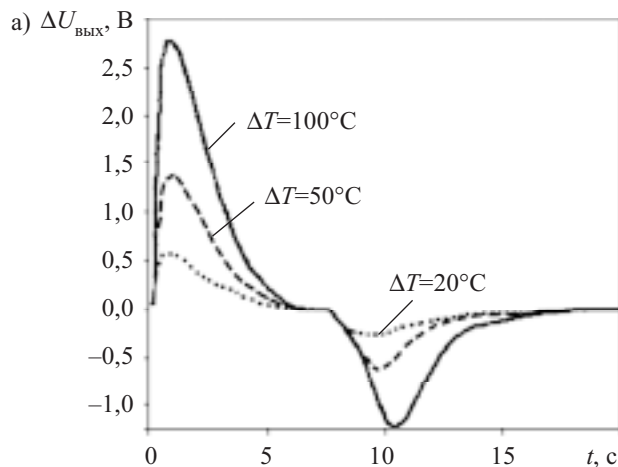
где C_d — емкость датчика;

$\tau_k = R_2 C_p$;

C_p — разделительная емкость;

$\tau = R_{\text{oc}} C_{\text{oc}}$;

$\alpha = (1 + R_1/R_2)$.



Анализ, проведенный с использованием метода Брауде [6], показал, что максимально плоскую форму амплитудно-частотной характеристики можно получить только при выборе C_p из выражения

$$\tau_k = R_2 C_p = 2\tau(\alpha - 1).$$

Номинал резистора R_{oc} в этом случае можно уменьшить в α раз. Полоса пропускания в области низких частот не изменится, а смещение выходного напряжения усилителя под действием пьезоэлектрического эффекта уменьшится во столько же раз (α).

Результаты экспериментальных исследований воздействия перепада температуры на пьезоэлектрический датчик типа АВС-132, подключенный к входу зарядочувствительных усилителей, собранных по схеме рис. 4, с различными частотно-зависимыми делителями в цепи ООС, представлены на рис. 5 ($f_n = 1,5$ Гц).

Как видно из рис. 5, под воздействием паразитного пьезоэлектрического тока напряжение на выходе зарядочувствительного усилителя с частотно-зависимым делителем изменялось незначительно даже при перепаде температуры в 100°C , что позволило произвести запись вибросигнала без потерь.

На рис. 6 приведена запись сигнала, полученного при испытании механизма, работающего с большой нагрузкой. Для измерения уровня вибрации использовалась схема усилителя, показанного на рис. 1, и схема усилителя, показанного на рис. 4 ($\alpha = 10$). При использовании ЗЧУ со схемой по рис. 1 испытания были остановлены на 90-й секунде (см. рис. 6, а), т. к. прекратилась запись сигналов от датчиков виброускорения (произошла перегрузка зарядочувствительного усилителя). При испытаниях со схемой ЗЧУ по рис. 4 запись сигнала, как видно из рис. 6, б, продолжалась на протяжении всего времени испытаний при больших перепадах температуры, воздействующих на пьезоэлектрический датчик.

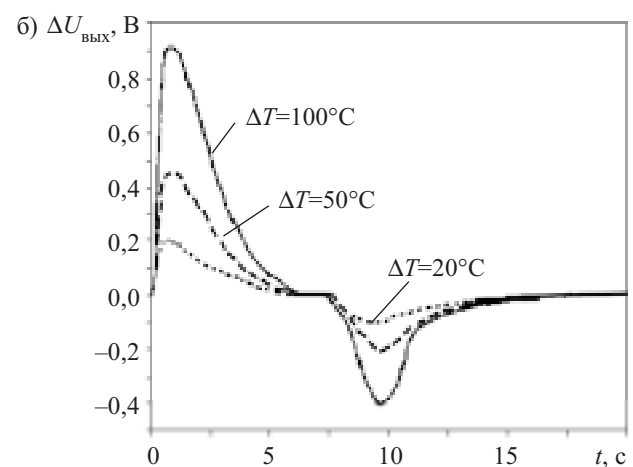


Рис. 5. Изменение уровня выходного напряжения ЗЧУ с частотно-зависимым делителем в цепи ООС, вызванное воздействием перепадов температуры на пьезодатчик:

а — $C_{\text{oc}} = 100$ пФ; $R_{\text{oc}} = 100$ Ом; $R_1 = 20$ МОм; $R_2 = 2$ МОм; $\alpha = 10$; $C_p = 0,1$ мкФ;
б — $C_{\text{oc}} = 100$ пФ; $R_{\text{oc}} = 30$ Ом; $R_1 = 20$ МОм; $R_2 = 0,7$ МОм; $\alpha = 30$; $C_p = 0,25$ мкФ

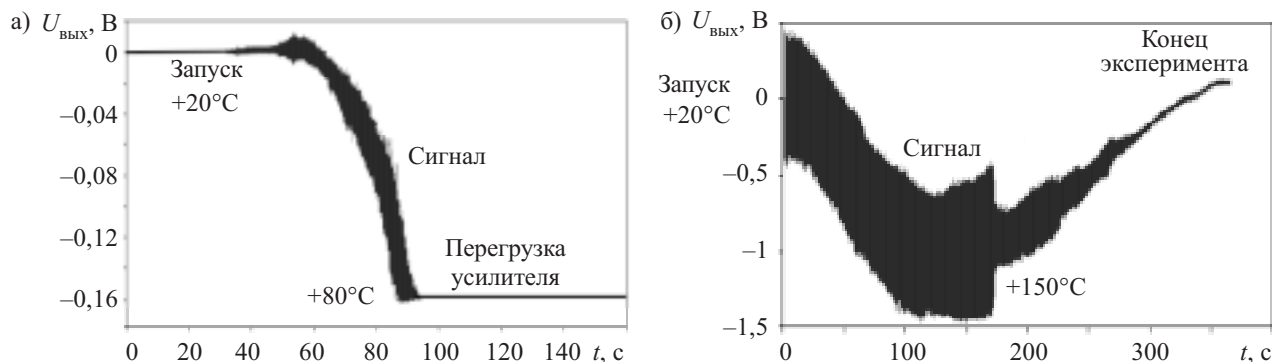


Рис. 6. Запись сигнала, полученного при испытании механизма (датчик АВС-132):
 а — схема ЗЧУ по рис. 1, $R_{oc}=1$ ГОм, $C_{oc}=100$ пФ; б — схема ЗЧУ по рис. 4, $\alpha=10$, $R_{oc}=100$ МОм, $C_{oc}=100$ пФ

Таким образом, можно избежать влияния эффекта генерирования паразитных зарядов на точность измерительных пьезоэлектрических вибропреобразователей. Это достигается оптимальным выбором датчика, использованием конструктивных теплоизолирующих решений и схемотехнических способов.

Экспериментальные исследования подтвердили правильность принятых мер по снижению влияния пьезоэлектрических токов, вызванных воздействием градиента температуры на пьезоэлектрический датчик, на уровень выходного напряжения зарядочувствительного усилителя.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Максимов В. П. Измерение, обработка и анализ быстропротекающих процессов в машинах. — М.: Машиностроение, 1987.
2. Шарапов В. М., Минаев И. Г., Бондаренко Ю. Ю. и др. Пьезоэлектрические преобразователи. — Черкассы: ЧГТУ, 2004.
3. Барфут Дж., Тейлор Дж. Полярные диэлектрики и их применение. — М.: Мир, 1981.
4. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. — М.: Техносфера, 2005.
5. www.pribor.ru
6. Мамонкин И. Г. Усилительные устройства. — М.: Связь, 1977.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Болл С. Р. Аналоговые интерфейсы микроконтроллеров. — М.: Додэка, 2007. — 360 с.

Данное издание является практическим пособием по применению различных интерфейсов для подключения аналоговых периферийных устройств к компьютерам, микропроцессорам и микроконтроллерам. Раскрывается специфика применения таких интерфейсов как I2C, SPI/Microware, SMBus, RS-232/485/422, токовая петля 4—20 мА и др. Дается обзор большого количества современных датчиков: температурных, оптических, ПЗС, магнитных, тензодатчиков и т. д. Подробно описываются контроллеры, АЦП и ЦАП, их элементы — УВХ, ИОН, кодеки, энкодеры. Рассмотрены исполнительные устройства — двигатели, терморегуляторы — и вопросы их управления в составе систем автоматического управления различного типа (релейного, пропорционального и ПИД). Книга снабжена иллюстрациями, наглядно представляющими аппаратные и программные особенности применения элементов аналоговой и цифровой техники.

Заинтересует не только начинающих радиолюбителей, но и специалистов, имеющих стаж работы с аналоговой и цифровой техникой, а также студентов технических колледжей и ВУЗов.

НОВЫЕ КНИГИ



Афонский А., Дьяконов В. Измерительные приборы и массовые электронные измерения. — М.: Солон, 2007. — 544 с.

Описаны самые современные измерительные приборы: измерители R, C и L, мультиметры, измерительные ВЧ- и НЧ-генераторы, импульсные и функциональные генераторы, аналоговые и цифровые стационарные и портативные осциллографы, в том числе уникальные. Особое внимание уделено массовым дешевым (бюджетным) приборам и технике измерений, в том числе с применением виртуальных и компьютеризированных лабораторий, и их применению в практике электронных измерений. Ряд материалов посвящен работе с современными цифровыми осциллографами и функциональными генераторами. Рассмотрена современная элементная база и схемотехника измерительных устройств. В книге около шестисот иллюстраций и осциллограмм.

Для работников служб ремонта и сервиса сложной электронной техники, научных работников и инженеров, студентов, аспирантов, преподавателей и лаборантов ВУЗов, а также для подготовленных радиолюбителей.

Д. т. н. С. А. НЕСТЕРЕНКО, к. т. н. О. Н. ПАУЛИН

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

Дата поступления в редакцию
09.07 2007 г.

Оппонент к. т. н. Ю. П. МАРДАМШИИ
(НКБ ЦОС ЮФУ, г. Таганрог)

ПОСТРОЕНИЕ ОБОБЩЕННОЙ МОДЕЛИ ОПЕРАЦИИ СВЕРТКИ МНОГОРЯДНЫХ КОДОВ ПРИ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКЕ СИГНАЛОВ

Рассматриваются известные модели, процедуры и методы свертки многорядных кодов (МРК). Строится обобщенная модель операции свертки МРК с учетом переносов.

Цифровая обработка сигналов (ЦОС) охватывает широкий круг практических приложений [1]: цифровая фильтрация, распознавание и кодирование речи, цифровая звукотехника, обработка изображений, быстрое преобразование Фурье и др. Как в этих, так и в других случаях ЦОС имеет общие особенности — большой объем вычислений и работу в реальном времени. Поэтому скорость обработки цифровых данных является во многих случаях определяющим фактором ЦОС.

Для аппаратной реализации ЦОС чаще всего используются сигнальные процессоры типа TMS320 (Texas Instruments), которые позволяют проводить обработку данных с высокой производительностью. Однако требования к быстродействию устройств ЦОС постоянно растут, поэтому актуальным является поиск новых подходов к построению таких устройств.

На рис. 1 представлена структура (а) цифрового фильтра (ЦФ) с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ); структура содержит k параллельно включенных универсальных звеньев второго порядка, называемых биквадратными блоками (б).

Функционирование биквадратного блока может быть описано выражением

$$Y(n) = a_0(X(n) - b_1X(n-1) - b_2X(n-2)) + a_1X(n-1) + a_2X(n-2). \quad (1)$$

Из этого выражения видно, что оба сумматора, входной и выходной, оперируют с тремя операндами, т. е. являются трехоперандными. При умножении цифровых сигналов на коэффициенты a_i и b_j нужно одновременное суммирование частичных произведений (их групп или всех), т. е. умножитель должен включать в себя многооперандный сумматор. Поскольку звенья БИХ включены параллельно (рис. 1, а), их выходные сигналы могут быть просуммированы одновременно. В этом случае число слагаемых (сигналов) равно $k+1$, т. е. сумматор также должен быть многооперандным. Множество операндов в совокупности можно рассматривать как

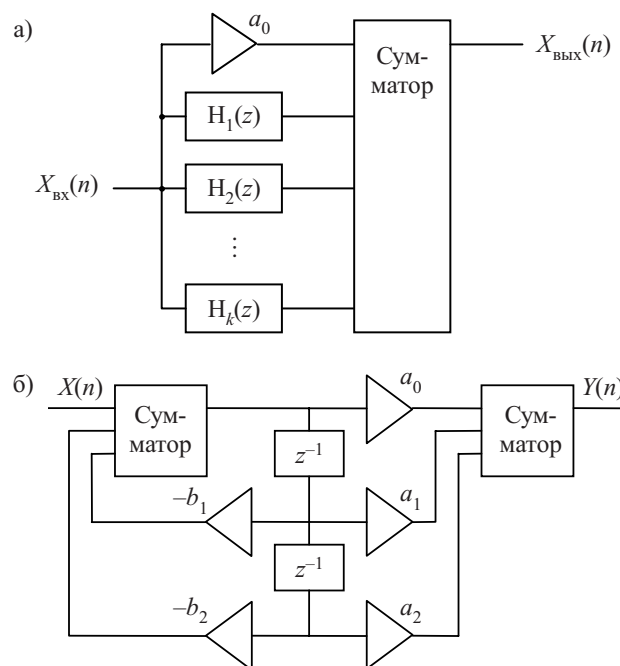


Рис. 1. Параллельная форма БИХ-фильтра:
а — структура; б — биквадратный блок; $H(z)$ — передаточная функция звена; z — параметр Z-преобразования

многорядные арифметические коды (МРК), которые нужно одновременно обработать.

Необходимость одновременной обработки многорядных кодов возникает также при суммировании потока данных, поступающих на вход суммирующего устройства, когда требуется за один операционный такт сложить группу слагаемых. Такая ситуация может возникнуть при решении задач матричной алгебры, при усреднении множества данных и т. п.

Для эффективной одновременной обработки множества данных в потоке, в том числе и при ЦОС, предложена многооперандная обработка [2], которая основана на следующей идее: любая арифметическая операция (например умножение) может быть сведена к операции сложения, которую можно представить как операцию свертки МРК. Такая обработка в зарубежной литературе носит название «распределенная арифметика».

Идея свертки МРК при выполнении операции сложения впервые была рассмотрена в [3] и развита в [4–8]; разработаны и соответствующие операци-

онные элементы [5, 9, 10]. В последнее время разработаны эффективные процедуры и методы свертки МРК [11—16], опирающиеся на аппарат симметрических булевых функций [17].

Из требования повышения скорости обработки потока данных вытекает необходимость ускорения операции свертки МРК и разработки подходящей для этого модели, которая учитывала бы все наработки в этой области.

Ниже рассматриваются известные процедуры и методы свертки МРК и организация переносов при этом; на основе обобщения свойств и особенностей рассмотренных методов строится усовершенствованная модель операции свертки МРК.

Известные модели, процедуры и методы свертки МРК

Рассмотрим известные модели операции суммирования в потоке данных [3, 7].

Заданы M слагаемых $A_1, A_2, \dots, A_M$ в двоичной системе счисления (СС):

$$A_i = 2^{g_j} \cdot \sum_{i=1}^{k_j} 2^{i-1} a_{ji}, \quad (2)$$

где i — номер разряда;

k_j — разрядность j -го слагаемого;

a_{ji} — значение i -го разряда для j -го числа.

При этом слагаемые сдвинуты влево на $g_j (g_j \geq 0)$ разрядов и некоторые из разрядов чисел A_j могут быть равны 0 [11].

В модели *горизонтальной обработки* искомая сумма (без учета входных переносов) равна

$$Q = \sum_{j=1}^M A_j = \sum_{j=1}^M 2^{g_j} \cdot \sum_{i=1}^{k_j} 2^{i-1} a_{ji}, \quad (3)$$

причем для суммирования используются бинарные сумматоры с горизонтальной организацией переноса по всей цепочке разрядов.

Перейдем к модели *вертикальной обработки*. Изменяя в формуле (3) порядок суммирования и заменяя k_j на N , а M на M_i , получим

$$Q = \sum_{i=1}^N 2^{i-1} \cdot \sum_{j=1}^{M_i} a_{ji}, \quad (4)$$

где N — количество разрядных срезов ($N = \max(k_j + g_j, 1 \leq j \leq M)$);

M_i — количество слагаемых в i -м разрядном срезе ($1 \leq i \leq N$).

Отметим, что разрядность суммируемого кода $M = \max M_i (1 \leq i \leq N)$.

Обозначим $a_i = \sum_{j=1}^{M_i} a_{ji}$, где a_i — количество единиц в i -м разрядном срезе. Тогда из (4) следует, что

$$Q = \sum_{i=1}^N 2^{i-1} a_i. \quad (5)$$

Обозначим M' минимальное количество разрядов, необходимое для представления поразрядной

суммы $\sum_{j=1}^{M_i} a_{ji}$. Поскольку эта сумма целочисленна, то из выражения

$$\sum_{j=1}^M a_{j(i)} \leq M \quad (6)$$

следует, что M' — наименьшее число, которое для двоичной системы счисления ($\alpha=2$) удовлетворяет неравенству [3, 7]

$$M \leq 2^{M'} - 1; \quad (7)$$

его решением является

$$M' = \lceil \log_2(M+1) \rceil, \quad (8)$$

где $\lceil s \rceil$ — наименьшее целое число, не меньшее, чем s .

Отметим, что описание моделей вертикальной обработки (выражения (4)—(8)) может быть обобщено на случай двоичнокодированных и недвоичных СС ($\alpha > 2$, α — целое).

В моделях (2) и (4) представлено поразрядное суммирование битов слагаемых, но не показаны ни порядок суммирования, ни организация переносов; эти моменты должны особо оговариваться.

Существуют два вида обработки (свертки) МРК — горизонтальная и вертикальная.

Первоначально процедура свертки кодов включала в себя поэтапное вычисление парных сумм на основе *горизонтальной* обработки, при которой использовалась бинарная операция поразрядного суммирования с полным распространением всех горизонтальных переносов. В этом случае количество этапов свертки равно $\lceil \log_2 n \rceil$, где n — количество разрядов слагаемых. Однако многоэтапная процедура свертки МРК на основе бинарного сумматора требует большого времени и ухудшает производительность устройства свертки (компрессора) в целом.

В настоящее время все шире применяется вертикальная обработка кодов. Процедуры, которые используются при этом, можно разделить на два направления — с непосредственной обработкой кодов и с предварительным упорядочиванием кодов.

Первое направление основано на поэтапной свертке m -рядного кода (группы данных одинаковой разрядности) в двухрядный код с последующим его суммированием на стандартном двухоперандном (бинарном) сумматоре с параллельным переносом (далее — параллельный сумматор). На каждом этапе количество полученных в результате рядов кода определяется по (8), так что процедура может быть представлена в виде $m \rightarrow m' \rightarrow m'' \rightarrow \dots \rightarrow 2$. При этом используется *метод*, основанный на базовой операции суммирования значений битов разрядного среза (РС) в едином операционном цикле. Для собственно свертки кодов используются одноразрядные полные сумматоры (как отдельные операционные элементы (ОЭ) либо как их сборки в виде узлов, деревьев), в каждом из которых складывается m цифр данного разряда и вычисляется их сумма в виде m' -разрядного числа, т. е. осуществляется преобразование $m \rightarrow m'$. Это направление представлено работами Храпченко [3, 4], Брика и Лушпина [5], Уоллеса [9], Санторо [10].

Второе направление развивалось в работах [6, 8].

В процедуре Ромма биты одного разряда результатов m' суммирования всех РС совмещаются (для каждого РС они помещаются в результирующей разрядной решетке по диагонали), затем полученный код результата добавляется к новой группе из m разрядов, и далее уже обрабатывается $(m+m')$ -рядный код. Суммирование осуществляется по методу предварительного упорядочивания кодов и проводится на параллельном счетчике одноразрядных чисел [18], построенном по принципу быстрого сдвига частичных кодов исходного двоичного непозиционного кода на каждом этапе его упорядочивания (k — номер этапа); результирующий код является унитарным. Отметим, что для подсчета числа единиц в исходном коде и представления его в двоичном виде упорядоченный код необходимо дополнительно пропустить через шифратор, а затем перевести в двоичный (α -ичный) код.

Окончательное суммирование с учетом переносов предпоследнего шага осуществляется параллельным сумматором на последнем шаге.

Процедура, изложенная в [8], заключается в многократном использовании метода деления упорядоченного кода РС на выбранное основание системы счисления $\alpha \geq 2$.

Гамаюн [7] предложил комбинированную процедуру, указав на резкое снижение эффективности свертки (в смысле скорости) на последних ее этапах. Его идея состоит в том, что однорядный код результата можно получить за три этапа, независимо от количества операндов исходного кода. На 1-м этапе аналогично [3] производится сжатие m -рядного кода в m' -рядный код ($m' = \lceil \log_2(m-1) \rceil + 1$) с помощью массива многовходовых одноразрядных сумматоров. На 2-м этапе проводится секционирование m' -рядного кода с целью его свертки в двухрядный код, причем каждая секция обрабатывается k -разрядным m' -операндным сумматором, где $k = \lceil \log_2(m'-1) \rceil + 1$. Разрядность секции k выбирается так, чтобы результат суммирования m' k -разрядных чисел имел не более $2k$ разрядов, что обеспечивает получение на выходе второго этапа двухрядного кода результата. Именно секционирование и упорядочивание кодов при суммировании позволяют добиться ускорения свертки МРК. На 3-м этапе двухрядный код суммируется стандартным образом на бинарном сумматоре с параллельным переносом.

Необходимость получения на втором этапе двухрядного кода ограничивает снизу минимальную разрядность секции k , что в зависимости от аппаратной реализации блока обработки секций приводит либо к чрезмерным затратам оборудования, либо к увеличению времени распространения сигнала и ухудшению быстродействия компрессора.

Методы вертикальной обработки можно разделить на два множества: 1) методы обработки кодов

каждого РС в отдельности; 2) методы обработки группы РС.

В первое множество входят:

— методы обработки РС одноразрядными многооперандными сумматорами [3, 4]. Они подразумевают пирамидальную организацию при схемотехнической реализации и не отличаются достаточно высоким быстродействием схемы, т. к. требуют дополнительного времени на обработку переносов;

— методы вертикального сложения [6, 8], которые заключаются в предварительном упорядочивании кода РС. Схемы на основе этой группы методов основаны либо на параллельных счетчиках [6], либо на пирамиде делителей [8]; эти схемы не являются достаточно быстрыми, поскольку требуют больших затрат времени на предварительное упорядочивание исходного кода РС.

Второе множество методов включает в себя методы покрытия битов кодов деревьями Уоллеса [9] и Санторо [10]. Деревья в первом случае строятся на операционных элементах типа 6-2, а во втором — на ОЭ типов 4-2 и 8-2; в свою очередь эти ОЭ строятся на одноразрядных полных сумматорах — CSA (carry-save adder), которые являются ОЭ типа 3-2.

Для этих методов характерна одновременная обработка всего слоя рядов кодов независимо от разрядности слоя за счет использования перетекания переносов ($Cin_{i+1} = Cout_i$) от места формирования переноса данного разряда до выхода результата последующего разряда (Carry). Это является достоинством этих методов.

Нами показано, что имеет место следующая асимптотическая зависимость количества рангов r полной пирамиды от количества рядов m МРК при заданном коэффициенте свертки k (заданном ОЭ) и заданном количестве t обрабатываемых рядов на заключительном этапе процедуры свертки МРК ($t=2$ для традиционных процедур и $t=3$ — для модифицированной нами процедуры):

$$r = \log_k m/t; \quad (9)$$

скачкообразное изменение r происходит при добавлении к полной пирамиде одного ряда.

При повышении значения k ($m = \text{const}$) глубина схемы уменьшается. Отметим к тому же, что при увеличении рядности m увеличивается не только r , но и (при многооперандной обработке) количество переносов, что усложняет схему и дополнительно увеличивает время обработки МРК.

Схемы на упомянутых деревьях тоже относятся к классу пирамидальных схем; глубина схемы определяется по (9), при этом $k=2, 3, 4$.

Отметим, что формула (9) не работает при дробном k , например, при $k=3/2$ (для ОЭ типа 3-2), т. к. округление, к которому нужно прибегать при использовании (9), искажает значение r ; вместо аналитического выражения можно предложить таблицу.

Зависимость глубины схемы от количества свертываемых рядов МРК

m	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14—19	20—28	29—42	43—63	64—94
r	1	2	3	3	4	4	4	5	5	5	5	6	7	8	9	10

К этому же множеству методов относятся методы, использующие исключение горизонтальных шагов [6]. В этих методах выполняются арифметические операции, сводящиеся к операции сложения, над потоком групп данных (группа — прямоугольный блок битов множества операндов определенной разрядности). Обработка осуществляется поблочно (на каждом шаге — свой блок), а обработка блока — поразрядно одновременно. Важная особенность обработки потока: переносы учитываются в конце выполнения всей операции, на заключительной стадии (отложенный перенос).

Время обработки РС $T \approx (2\log_2 m + 3)\tau$ состоит из времени работы сдвигающего (2 $\log_2 m$), времени шифрования результата обработки РС (2 τ) и времени перевода сигнала шифратора в двоичный код (1 τ). На заключительной стадии несколько рядов кодов предварительно сжимаются в два ряда, а далее используется бинарный полноразрядный параллельный сумматор. Это снижает эффект от экономии времени, который получен за счет исключения обработки переносов на промежуточных стадиях.

Известные методы организации переносов

В операции свертки арифметических МРК важную роль играют методы организации межразрядных переносов [15]. Исследованием организации переноса занимались многие авторы. Так, Угрюмов [19] рассмотрел основные виды переносов при бинарном сложении, уделив много внимания групповым и многоярусным методам организации переноса. Глассер [20] предложил двухбитовую непозиционную организацию переноса для трехоперандного сумматора. Ромм [6] рассмотрел перенос, который можно назвать *отложенным*, при параллельном суммировании группы кодов. В деревьях Уоллеса и Санторо [9, 10] для свертки МРК используется перенос, который можно назвать *стекающим*.

Будем различать переносы поразрядные (внутренние) и результирующие (выходные) для всего компрессора (его каскада). Перенос образуется, если сумма битов операндов данного разряда превышает 1; количество битов переноса определяется максимальным значением суммы битов операндов данного РС.

Значение бита переноса определяется по тем же правилам, что и значение бита суммы, поскольку бит переноса определяется результатом суммирования битов операндов.

Переносы можно разделить на два вида: *позиционные* и *непозиционные*¹. В свою очередь позиционные переносы делятся на *последовательные*, *сквозные*, *параллельные*, *стекающие* и др., а непозиционные — на переносы двух подвидов, *двухбитовые* и *многобитовые*. Наиболее эффективными являются параллельный позиционный и многобитовый непозиционный перенос; к последнему можно отнести также стекающий перенос. Особая организация переноса предложена Роммом.

Параллельный перенос в бинарном сумматоре организуется с помощью специальных функций ге-

нерации и прозрачности [19, 21]. При большой разрядности n сумматора она разбивается на группы по p ($p \leq 8$) разрядов, и над всеми группами строится ярус ускоренного (параллельного) переноса; в свою очередь разрядность ($k = n/p$) яруса также может быть разбита на свои группы, и тогда над ними строится следующий ярус схем ускоренного переноса. Важно отметить, что функции, описывающие перенос для ярусов, структурно одинаковы и подобны функциям генерации и прозрачности.

Идея организации переносов Ромма [6] сводится к следующему. На каждом шаге суммируются биты РС, составляющих группу данных. Переносы, возникающие при этом от каждого РС, запоминаются в разрядной решетке, причем они располагаются в ней по диагонали; суммирование битов переносов не производится. Эти биты присоединяются на следующем шаге к новой группе данных, и далее повторяется предыдущий шаг относительно расширенной совокупности битов. Так происходит до последнего шага, на котором производится окончательное суммирование на параллельном сумматоре с учетом битов переносов. Такого рода перенос будем называть *отложенным*. Достоинством этого подхода является то, что перенос может быть отложен до окончания серии арифметических операций, каждая из которых может быть выражена через операцию суммирования. Окончательное суммирование производится на бинарном сумматоре на быстрых сдвигающих [18].

Уоллес [9] и Санторо [10] предложили для свертки одного РС элементы типов 6-2 и 4-2, соответственно (рис. 2). Здесь действуют внутренние переносы (Cout из данного РС и Cin — в следующий РС). Образовавшиеся в данном разряде внутренние переносы являются входными битами в следующий разряд, где они формируют бит суммы следующего разряда и переносов через разряд — имеет место стекание переноса из верхнего яруса элемента данного разряда в нижний ярус элемента следующего разряда и, далее, стекание его на выход через разряд.

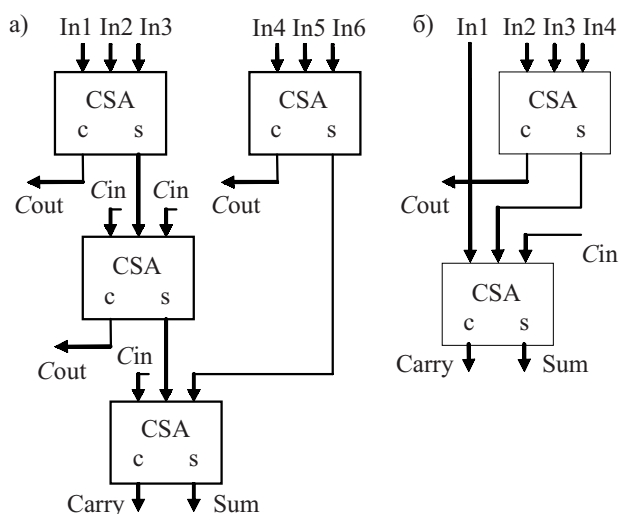


Рис. 2. Операционные элементы:

a — Уоллеса; b — Санторо; c, s — выходы переноса и суммы из сумматора CSA

¹ Связь между позиционным и непозиционным переносом рассмотрена в [12].

Принцип построения деревьев из таких ОЭ аналогичен предложенному Храпченко [3] и заключается в следующем: множество m битов данного РС обрабатывается параллельно элементами Уоллеса (Санторо) на данном этапе; полученные в результате двухрядные коды в совокупности (m') снова обрабатываются такими же ОЭ на следующем этапе, и так до тех пор, пока не останется один двухрядный код; окончательный результат получается при использовании бинарного параллельного сумматора — суммируются биты Sum_i и Carry_{i-1} .

В [5] рассмотрен пример четырехрядного узла 4-2, обрабатывающего 4 ряда кодов. Отметим, что для получения окончательного переноса из узла необходимо просуммировать переносы на 5-м разряде Cout и Carry_i , выходящих из старшего разряда.

ОЭ2 — это элементы, разработанные нами [22], подобие элементов Уоллеса и Санторо. Отличие заключается в том, что в ОЭ2 предусматривается несколько выходных переносов. Таковым элементом является разработанный нами [14] одноразрядный ОЭ типа 4-3 с двумя выходными переносами Carry_i ; этот компрессор введен в схему сумматора типа «ромб» с целью ее оптимизации по быстродействию. Несомненным достоинством деревьев при свертке МРК с их помощью является возможность обработки слоя кодов (4 или 6, а также кратное им число рядов) с практически неограниченной разрядностью. Однако результирующее сжатие 2-1 не является наилучшим решением. Лучшие результаты по быстродействию могут быть получены при заключительной свертке МРК вида 3-1 — см. выше.

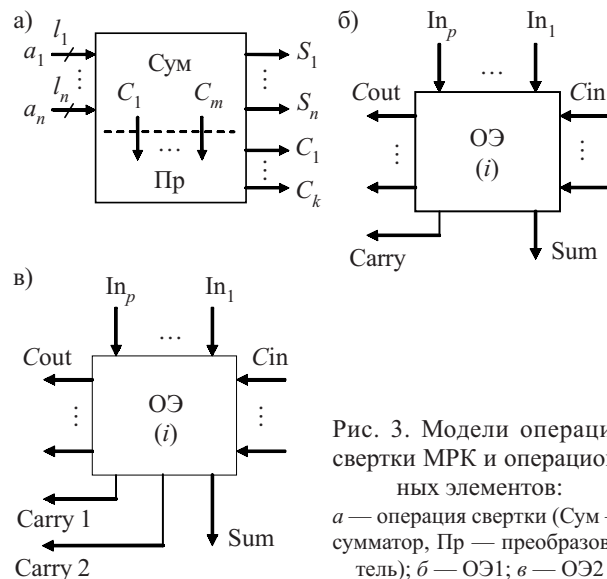
Итак, рассмотренные виды переносов обладают определенными достоинствами и недостатками; выбор того или иного вида переносов зависит от конкретной ситуации (предъявленных требований по быстродействию и аппаратным затратам). По быстродействию их можно выстроить так: предпочтительнее подход Ромма, ему уступает подход Гамаяна, а далее идут с одинаковым быстродействием подходы Храпченко, Карцева и Брика, Санторо и Уоллеса.

Обобщенная модель операции свертки МРК

Анализ известных процедур и методов организации переносов выявил следующие их недостатки: узкая номенклатура конфигураций области битов (ОБ) (прямоугольник и параллелограмм); использование на последнем этапе свертки бинарного параллельного сумматора ($t=2$); не уделяется достаточно внимания оптимальной организации переносов при свертке МРК.

На основе рассмотренных модели вертикальной обработки [7] (см. также (5)), процедур и методов свертки МРК нами предлагается обобщение модели операции свертки МРК, которое устраняет указанные недостатки.

На рис. 3 представлены предлагаемая модель операции свертки МРК и модели операционных элементов для свертки одного разряда (разрядного среза) МРК. Здесь обозначено: $a_1, \dots, a_n$ — разрядные срезы (РС); $l_1, \dots, l_n$ — количество битов (одноразряд-



ных слагаемых) в РС; $S_1, \dots, S_n$ — поразрядные значения суммы; $C_1, \dots, C_m$ — внутренние переносы; $C_1, \dots, C_k$ — результирующие позиционные переносы. Обозначения для ОЭ: $\text{In}_1, \dots, \text{In}_p$ — биты РС; Cin , Cout — биты внутреннего переноса, входного и выходного, соответственно; Carry — внешний перенос в следующий разряд; Sum — сумма битов РС.

Понятие «обобщенная модель операции свертки МРК» включает в себя следующие составляющие: 1) математическое описание операции свертки МРК (выражения (4)–(8)); 2) область битов операндов $a_1, \dots, a_n$ произвольной разрядности; 3) способы разбиения исходной области битов на фрагменты; 4) процедуры свертки, включающие в себя несколько этапов, причем на каждом этапе используется свой метод обработки МРК; 5) методы организации переносов при свертке кодов; 6) модели ОЭ.

Под областью битов в общем случае понимается совокупность рядов арифметических кодов с произвольной разрядностью, по-разному сдвинутых друг относительно друга — см. (4). Для свертки МРК при большом числе рядов кодов используется разбиение множества рядов кодов на слои (их фрагменты) и свертка полученных слоев (их фрагментов), а далее — свертка рядов полученных результатов. Область битов может быть разбита на фрагменты [13], регулярные (например прямоугольники, ромбы и др.) и нерегулярные; в [13] же приведены теоремы о количестве переносов из данного фрагмента.

Необходимость разбиения определяется сложностью компрессора, которая в случае применения многооперандных структур пропорциональна квадрату числа разрядов и экспоненциальной функции от числа сжимаемых рядов. Разбиение должно быть проведено таким образом, чтобы процедура свертки и компрессор для ее реализации соответствовали выбранному критерию качества.

Нами исследованы различные подходы к повышению скорости выполнения операции свертки кодов [12–16] и разработке соответствующих методов с использованием многооперандных сумматоров

на основе аппарата симметрических функций. Так, нами предложена модификация процедуры [7], имеющая вид $m \rightarrow m' \rightarrow 3 \rightarrow 1$, которая предполагает свертку разработанными нами операционными элементами типа $m' \rightarrow 3$ [22] на втором этапе и на заключительном этапе — специального сумматора трех слагаемых с параллельным переносом [16], организованного подобно классическому переносу в бинарном сумматоре [19, 21].

Такая модификация позволяет ускорить процедуру свертки вида $t \rightarrow 1$. Действительно, параллельные сумматоры 3-1 и 2-1 имеют одинаковые структуры и потому при построении их схем в базисе И—ИЛИ имеют одинаковую задержку. С другой стороны, при одинаковом 1-м этапе процедуры свертки $m \rightarrow m'$ 2-й этап характеризуется такими коэффициентами свертки: при традиционной процедуре $\kappa_{\text{тр}} = m'/2$, при модифицированной — $\kappa_{\text{мод}} = m'/3$, т. е. на свертку $m' \rightarrow 3$ требуется меньше времени, чем на $m' \rightarrow 2$.

Таким образом, время свертки по модифицированной процедуре меньше времени свертки по традиционной процедуре.

Операция свертки имеет (рис. 3, а) две составляющие: суммирование с формированием внутренних переносов и их преобразование в выходные переносы. Собственно для суммирования используется простая операция сложения по модулю 2. Преобразователь переносов нужен для пересчета значений битов внутренних переносов в значения битов выходных переносов [15] (как правило, они являются позиционными); пересчет необходим в двух случаях: внутренние переносы — непозиционные, либо из старшего разряда имеется несколько внутренних переносов одного веса.

На рис. 3, б и в приведены два вида одноразрядных операционных элементов — ОЭ1 и ОЭ2; для обоих ОЭ используются одинаковые обозначения: In — биты слагаемых; Sum — бит суммы; Cout — биты внутренних переносов; Cin — биты входных переносов в данный элемент; Carry — биты выходных переносов из данного разряда (для ОЭ2 используется два переноса — в следующий разряд и через разряд).

ОЭ1 представляют собой элементы Уоллеса и Санторо; здесь используются те же обозначения, что и на рис. 2.

К рассмотренным выше переносам можно добавить исследованные нами переносы, явные и неявные. В [8] перенос явно не определяется. В работах [12, 13, 16] рассмотрены многобитовый непозиционный перенос (обобщение переноса Глассера) и позиционный параллельный перенос в различных регулярных фрагментах области битов; в некоторых случаях используется неявный перенос.

В [12—16] предложены методы свертки МРК, использующие симметрию битов каждого РС. В этих методах существенно используется свойство независимости результата от любой перестановки суммируемых битов, из чего и следует их симметрия [17]. В частности, нами предложен табличный метод описания функционирования арифметических устройств

[12]; таблица функционирования по существу является обобщенной таблицей истинности.

Разработанная нами программа позволяет вычислять значения сумм для группы данных без явного вычисления значений внутренних переносов (непосредственное использование свойств симметричных функций, описывающих функционирование сумматора). Именно эти значения и составляют таблицу функционирования; здесь нет необходимости в явном переносе. Схема, построенная по таблице функционирования, обладает наименьшей задержкой из всех схем, рассмотренных выше. Недостатком такого подхода является экспоненциальный рост сложности схемы при росте числа обрабатываемых рядов арифметических кодов.

Заключение

В обобщенной нами модели предусмотрены различные процедуры и методы обработки области битов произвольной конфигурации, различные операционные элементы для свертки фрагментов многорядных арифметических кодов, выделены внутренние и выходные переносы; модель учитывает организацию быстрых переносов. К настоящему времени разработаны мощные методы суммирования и умножения на его основе при реализации вычислительных операций над группой данных в едином операционном цикле. Такое разнообразие подходов и средств позволяет построить множество альтернативных решений, удовлетворяющих различным время-сложностным критериям.

При малых значениях количества рядов m ($m \leq 8$) лучшие результаты дает наш подход. В [22] нами предложены ОЭ, позволяющие более быстро свертывать МРК.

Предложенная модель апробирована на многих приложениях. Так, при построении быстродействующего умножителя 8×8 [14] проведено разбиение исходного ромба битов частичных произведений на одинаковые подромбы; для них построено несколько вариантов сумматоров типа «ромб». Окончательная свертка осуществляется компрессором 3-1 [16]. Показано, что непосредственное использование аппарата симметрических функций для построения сумматора типа «ромб» в составе умножителя 8×8 дает выигрыш в быстродействии в 1,5 раза по сравнению с известным решением, основанным на деревьях Санторо.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2004.
2. Гамаюн В. П. О развитии многооперандных вычислительных структур // Управляющие системы и машины. — 1990. — № 4. — С. 31—33.
3. Храпченко В. М. Об одном способе преобразования многорядного кода в однорядный // Докл. АН СССР. — 1963. — Вып. 148. — № 2. — С. 296—299.
4. Храпченко В. М. Методы ускорения арифметических операций, основанные на преобразовании многорядного кода // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Электронная вычислительная техника. — 1965. — Вып. 8. — С. 121—144.
5. Брик В. А., Лушпин Л. И. Преобразование многорядного кода в двухрядный при помощи однотипных узлов // Там же. — 1973. — Вып. 7. — С. 94—116.

6. Ромм Я. Е. Метод вертикальной обработки потока целочисленных групповых данных. 1. Групповые арифметические операции // Кибернетика и системный анализ.— 1998.— № 3.— С. 123—151.
7. Гамаюн В. П. Способ ускоренного преобразования многорядного кода в однорядный // Управляющие системы и машины.— 1995.— № 4/5.— С. 10—14.
8. Дрозд А. В., Паулин О. Н., Дрозд Ю. В. Выполнение операции вертикального сложения в арифметических устройствах // Тр. Одес. политехнич. ун-та.— 1997.— Вып. 2.— С. 30—32.
9. Walles C. S. A suggestion for a fast multiplier // IEEE Trans. Comput.— 1964.— Vol. EC-13.— N 1.— P. 14—17.
10. Santoro M. R. Design and clocking of VLSI multipliers / Stanford University, Computer Systems Laboratory. Report Number: CSL-TR-89-397, October 1989.
11. Паулин О. Н., Ляховецкий А. М. Модифицированный метод суммирования многорядных кодов на основе многооперандных сумматоров // Тр. Одес. политехнич. ун-та.— 1999.— Вып. 3.— С. 147—148.
12. Паулин О. Н., Ляховецкий А. М. Модель и метод проектирования многооперандных сумматоров на базе симметрических функций // Тези доповідей на міжнар. конф. з індуктивного моделювання МКІМ-2002.— Львів.— 2002.— С. 208—213.
13. Паулин О. Н. К построению быстродействующих арифметических устройств / В сб.: Искусственный интеллект. Спецвыпуск. Т. 3.— Донецьк: ІПШІ, 2002.— С. 314—322.
14. Паулин О. Н. К разработке умножителя на основе сумматора типа ромб / В сб.: Искусственный интеллект. Т. 4.— Донецьк: ІПШІ, 2006.— С. 35—41.
15. Paulin O. N. On carry organization in compressing multi-row codes / Pattern Recognition and Information Processing (PRIP'05): Proceedings of the Eighth International Conference.— Minsk.— 2005.— P. 454—456.
16. Паулин О. Н. О свертке трехрядных кодов // Управляющие системы и машины.— 2005.— № 5.— С. 68—72.
17. Паулин О. Н. К построению прикладной теории симметрических булевых функций / В сб.: Искусственный интеллект. Т. 4.— Донецьк: ІПШІ, 2005.— С. 245—255.
18. Ромм Я. Е. Метод вертикальной обработки потока целочисленных групповых данных. II. Приложение к бинарным арифметическим операциям // Кибернетика и системный анализ.— 1998.— № 6.— С. 146—162.
19. Угрюмов Е. П. Цифровая схемотехника.— СПб: БХВ-Петербург, 2004.
20. Pat. 3906211 USA. Three-word adder carry propagation / A. B. Glasser; Bell Telephone Lab.— 1975.
21. Карцев М. А., Брик В. А. Вычислительные системы и синхронная арифметика.— М.: Радио и связь, 1981.
22. Нестеренко С. А., Паулин О. Н. К синтезу операционных элементов типа m-3 // Мат-лы МНПК «Информационные технологии и информационная безопасность в науке, технике и образовании «Инфотех-2007». Ч. 1.— Севастополь.— 2007.— С. 40—43.

НОВЫЕ КНИГИ

Новожилов О. П. Основы микропроцессорной техники. В 2-х томах. Том 1.— М.: РадиоСофт, 2007.— 432 с.

Излагаются основные концепции микропроцессорной техники, структурно-функциональные особенности микропроцессоров, микроконтроллеров и сигнальных процессоров, современные технологии обработки цифровой информации и средства их обеспечения. Книга состоит из двух томов, в которые вошли три раздела, и написана как учебное пособие.

Первый раздел служит введением в микропроцессорную технику: рассмотрены общие принципы построения процессоров; приведены основные понятия и начальные сведения о микропроцессорах и микропроцессорных системах; рассмотрены структурно-функциональная организация процессоров, регистровые модели, способы адресации, система команд и организация циклов их выполнения. Излагаются вопросы структурно-функциональной организации микропроцессорных систем: рассмотрены их типовые структуры и аппаратные средства, вопросы организации ввода/вывода, прерываний и прямого доступа к памяти.

Во втором разделе излагаются общие вопросы структурно-функциональной организации микроконтроллеров, а также средства их программирования и отладки. Приводится материал по конкретным контроллерам с RISC- и CISC-архитектурой. Рассмотрены структурно-функциональная организация, программные модели и система команд сигнальных процессоров, предназначенных для вычислений с фиксированной точкой.

В третьем разделе рассмотрены архитектурные и другие особенности универсальных процессоров, вопросы взаимодействия процессора с основной памятью (концепция и средства взаимодействия, организация основной памяти и кэша, защита памяти и многозадачность); процессорные технологии (обработка прерываний и исключений, представление и обработка данных с плавающей точкой, технологии MMX и SSE, суперскалярная и мультискалярная технологии). Приведен материал по конкретным семействам современных универсальных процессоров.

В первый том вошли 1-й и 2-й разделы.

Книга адресуется всем желающим ознакомиться с основами микропроцессорной техники и, в первую очередь, студентам ВУЗов и техникумов.



Д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ, к. ф.-м. н. Д. М. ЁДГОРОВА,
к. т. н. Р. А. САИДОВА, Ф. А. ГИЯСОВА

Узбекистан, г. Ташкент, НПО «Физика–Солнце»
E-mail: karimov@uzsci.net

Дата поступления в редакцию
27.08.2007 г.

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

АНОМАЛЬНЫЙ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В СТРУКТУРЕ С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ–МОТТА

Обнаруженный фотовольтаический эффект сопровождается сменой знака фототока при переходе из области собственного поглощения к примесному в легированной кислородом двухбазовой структуре $Ag-N^0AlGaAs-n^+GaAs-n^0GaInAs-Au$, представляющей интерес для волоконно-оптических систем.

Интерес к структурам, чувствительным в инфракрасной (ИК) области спектра, обусловлен возрастающей потребностью в них при разработке различных информационных систем. Поиски путей повышения эффективности ИК-фотоприемников набирают темпы. В последние годы большое внимание уделяется исследованиям фотоэлектрических характеристик структур с блокированной проводимостью [1] и с изотипными переходами [2].

На изотипных N – n -гетеропереходах узкозонный полупроводник играет роль металла [3], что позволяет реализовать в них те процессы, которые свойственны структурам с барьером Шоттки.

Аналогичным образом объясняются фотовольтаические эффекты, обнаруженные в структурах с блокированной проводимостью. В известных структурах с изотипными переходами типа $n^+-GaSb-n^0-GaInAsSb-n^+-GaAlAsSb$ фоточувствительность в длинноволновой области спектра (1–2 мкм) достигается при определенных рабочих напряжениях, что вызывает увеличение шумовых токов.

В работе [1] были предложены ВІВ-структуры (Blocked Impurity Band) с блокированной проводимостью p^+-i-p^+ в качестве примесного фотоприемника дальнего инфракрасного диапазона, работающего при гелиевых температурах. Его основное преимущество перед классическим примесным фотоприемником — в сочетании высокой квантовой эффективности при высоком уровне легирования фоточувствительного слоя с пониженным уровнем шума, обусловленным наличием блокирующего слоя. Это позволило создать матричные фотоприемные устройства, работающие в спектральном диапазоне 0,4–40 мкм [4].

Рассматривая переходы «металл–полупроводник», следует отметить, что классический диод Шоттки содержит высокоомную базовую область, сформированную на сильнолегированной подложке, что

может привести в результате к образованию между ними изотипного барьера, а изотипные гетеробарьеры могут рассматриваться как двойные барьеры Шоттки [5]. Однако реальные структуры с двойными барьерами могут существенно отличаться от теоретических моделей в зависимости от параметров базовой области, т. к. при определенной ее толщине емкость барьера перестает зависеть от рабочего напряжения, что является результатом создания барьера Мотта.

Исследуемая структура $Ag-N^0AlGaAs-n^+GaAs-n^0GaInAs-Au$ содержит два барьера (один из них — Мотта, а другой — Шоттки) с соответствующими базовыми областями, сформированными на обеих поверхностях общей подложки. При создании такой структуры мы преследовали цель получения фотоэлектрического усиления за счет наличия двух барьеров [6] и фотовольтаического эффекта благодаря формированию базовой области из высокоомного материала.

В настоящей работе приводятся результаты исследования обнаруженного при комнатной температуре фотовольтаического эффекта, который сопровождается сменой знака фототока при переходе из области собственного поглощения к примесному в широком диапазоне спектра (0,4–2 мкм) в легированной кислородом двухбазовой структуре $Ag-N^0AlGaAs-n^+GaAs-n^0GaInAs-Au$.

Основные параметры исследуемых двухбазовых структур

Исследуемые структуры получены выращиванием гетерослоев методом жидкофазной эпитаксии [7]: $N^0AlGaAs$ — на одну поверхность и $n^0GaInAs$ — на вторую поверхность сильнолегированной подложки из монокристаллического $n^+GaAs:Te$ с концентрацией носителей $n \approx 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и толщиной 350–400 мкм. При выращивании эпитаксиальных слоев $N^0AlGaAs$ и $n^0GaInAs$ в качестве источника использовали n^0GaAs , легированный кислородом, с концентрацией носителей $4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. В обоих случаях толщина эпитаксиальных слоев составляла 2–3 мкм. Со стороны широкозонного гетерослоя был сформирован выпрямляющий полупрозрачный потенциальный барьер (70 Å) из Ag , а со стороны узкозонного гетерослоя — из Au . Таким образом, была получена двухбазовая $Ag-N^0AlGaAs-n^+GaAs-n^0GaInAs-$

Au-структура, типичная геометрическая конструкция которой приведена на **рис. 1**.

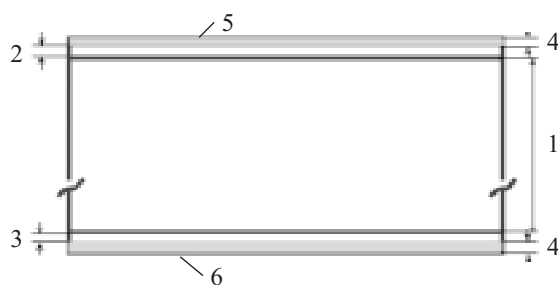


Рис. 1. Конструкция двухбазовой структуры:

1 — $n\text{GaAs}$ (концентрация $2,10^{18} \text{ см}^{-3}$, толщина 400 мкм); 2 — $n\text{GaInAs}$ (концентрация $4,10^{15} \text{ см}^{-3}$, толщина $1,5 \text{ мкм}$); 3 — $n\text{AlGaAs}$ (концентрация $4,10^{15} \text{ см}^{-3}$, толщина 2 мкм); 4 — слой объемного заряда; 5 — Au-барьер Шоттки; 6 — Ag-барьер Мотта

Здесь следует отметить, что формирование потенциальных барьеров на обе поверхности обеспечивает двухстороннюю фоточувствительность структуры, а различие состава материала подбарьерных областей позволяет задавать спектральный диапазон со стороны возбуждаемой поверхности. В зависимости от длины волны освещения коэффициент поглощения фотонов различен, и генерация носителей будет происходить в различных областях структуры. Так, коротковолновое излучение поглощается на меньшей глубине в приповерхностной области, а длинноволновое — чем длиннее, тем глубже будет проникать, достигая квазинейтральных областей базы. В результате фотоносители будут эффективно разделяться в областях, отраженных на спектральных характеристиках, т. е. на основе спектральных характеристик можно определить энергетические параметры базовой области структуры.

При освещении $\text{Ag}-N^0\text{AlGaAs}-n^+\text{GaAs}-n^0\text{GaInAs}-\text{Au}$ -структуры со стороны $n^0\text{GaInAs}-\text{Au}$ -перехода на спектральной характеристике при длине волны $0,94 \text{ мкм}$ появляется один пик (**рис. 2**), который соответствует оптической ширине запрещенной зоны $n^0\text{GaInAs}$, равной $1,32 \text{ эВ}$.

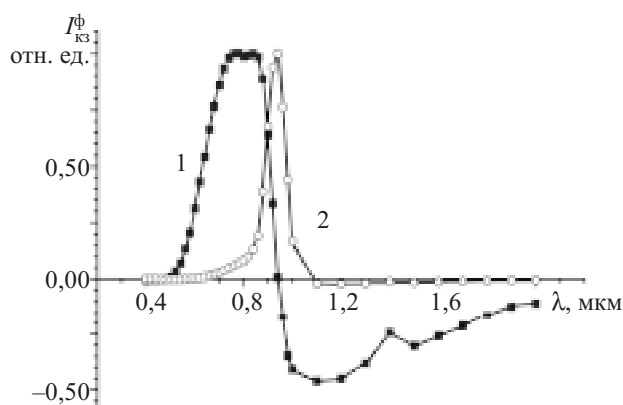


Рис. 2. Спектральная характеристика $\text{Ag}-N^0\text{AlGaAs}-n^+\text{GaAs}-n^0\text{GaInAs}-\text{Au}$ -структуры при комнатной температуре в режиме тока короткого замыкания при освещении со стороны перехода $\text{Ag}-N^0\text{AlGaAs}$ (1) и со стороны перехода $n^0\text{GaInAs}-\text{Au}$ (2)

Отсюда на основании экспериментального значения ширины запрещенной зоны путем расчета, приведенного в работе [8, с. 18—21], можно определить расчетное значение состава твердого раствора InGaAs . Подставляя значение $E_g = 1,32 \text{ эВ}$ в формулу (1), получим

$$E_g(\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}) = 0,36 + 1,064x = 1,32 \text{ эВ}, \quad (1)$$

откуда

$$x = (1,32 - 0,36) / 1,064 = 0,9. \quad (2)$$

Соответственно имеем следующий состав: $\text{Ga}_{0,9}\text{In}_{0,1}\text{As}$.

Что касается содержания Al, то его количество по технологическим данным равно $y = 0,2$ [9, с. 259—262]. На основании экспериментального значения ширины запрещенной зоны путем расчета, приведенного в работе, можно определить расчетное значение состава твердого раствора $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Подставляя в формулу (3) значение $E_g = 1,67 \text{ эВ}$, соответствующее оптической ширине запрещенной зоны гетерослоя AlGaAs (рис. 2), получим

$$E_g(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}) = 1,424 + 1,247x = 1,67 \text{ эВ}, \quad (3)$$

откуда

$$x = (1,67 - 1,424) / 1,247 = 0,197 \approx 0,2. \quad (4)$$

Соответственно имеем следующий состав: $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$.

Высота потенциальных барьеров «металл—полупроводник» определяется из зависимости корня квадратного фотоотклика, пересчитанного на один фотон, от энергии фотона [10, с. 303—304]. Согласно данным, определенным из спектральных характеристик (рис. 2) для переходов $\text{Ag}-N^0\text{AlGaAs}$ и $n\text{GaInAs}-\text{Au}$, соответственно имеем $\phi^{m-N} = 0,62 \text{ эВ}$, $\phi^{n-m} = 0,6 \text{ эВ}$.

Как видим, ширина запрещенной зоны областей в одном направлении убывает, начиная от $N^0\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ до $\text{Ga}_{0,9}\text{In}_{0,1}\text{As}$, а именно, ширина запрещенной зоны базовой области $N^0\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ равна $1,67 \text{ эВ}$, низкоомной подложки $n^+\text{GaAs}$ — $1,43 \text{ эВ}$ и узкозонной базовой области $\text{Ga}_{0,9}\text{In}_{0,1}\text{As}$ — $1,32 \text{ эВ}$.

Остальные параметры, необходимые для полного анализа физических процессов, протекающих в $\text{Ag}-N^0\text{AlGaAs}-n^+\text{GaAs}-n^0\text{GaInAs}-\text{Au}$ -структуре, можно получить из физических параметров материалов, составляющих структуру.

Так, контактная разность потенциалов, создающая слой объемного заряда между металлом и полупроводником, равна разности между высотой барьера ϕ и зазором между зоной проводимости и уровнем Ферми.

$$U_K^{m-N} = \phi^{m-N} - (E_{CN} - F_N),$$

где E_{CN} — энергия зоны проводимости;
 F_N — положение уровня Ферми.

В зависимости от концентрации носителей положение уровня Ферми более точно можно определить графическим способом на основе данных, приведенных в работе [11, с. 56—61]. В частности, для $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ с концентрацией носителей $1,10^{15} \text{ см}^{-3}$ его значение равно $0,26 \text{ эВ}$, а для $\text{Ga}_{0,9}\text{In}_{0,1}\text{As}$ (с уче-

том ширины запрещенной зоны) — 0,24 эВ. Тогда контактные разности потенциалов будут равны:

$$U_K^{m-N} = \varphi^{m-N} - 0,26 \text{ эВ} = 0,36 \text{ эВ};$$

$$U_K^{n-m} = \varphi^{n-m} - 0,24 \text{ эВ} = 0,36 \text{ эВ},$$

т. е. это предельные напряжения, прилагаемые в прямом направлении, когда переход «металл—полупроводник» становится прозрачным.

Создаваемые на границе гетеропереходов разрывы в зоне проводимости и в валентной зоне определяются разностью электронного сродства каждой из областей. В нашем случае имеем два изотипных гетероперехода $N^0\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}-n^+\text{GaAs}$ и $n^+\text{GaAs}-n^0\text{Ga}_{0,9}\text{In}_{0,1}\text{As}$. Для данного состава алюминия ($x=0,2$) разрыв в зоне проводимости определяется из выражения [8]:

$$\begin{aligned} \Delta E_C &= 0,85(E_g^N - E_g^{n+}) = \\ &= 0,85(1,67 - 1,43) = 0,204 \text{ эВ}, \end{aligned} \quad (5)$$

а в валентной зоне

$$\begin{aligned} \Delta E_V &= (E_g^N - E_g^{n+}) - 0,204 = \\ &= 0,24 - 0,204 = 0,036 \text{ эВ}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для гетероперехода $n^+\text{GaAs}-n^0\text{Ga}_{0,9}\text{In}_{0,1}\text{As}$ соответственно имеем разрыв в зоне проводимости, определяемый разностью электронных сродств (χ) GaAs и $\text{Ga}_{0,9}\text{In}_{0,1}\text{As}$:

$$\Delta E_C = |\chi^{n+} - \chi^n| = |4,05 - 4,1| = 0,05 \text{ эВ},$$

а в валентной зоне

$$\Delta E_V = (E_g^{n+} - E_g^n) - 0,05 = 0,11 - 0,05 = 0,06 \text{ эВ}.$$

Энергетическая зонная диаграмма $\text{Ag}-N^0\text{AlGaAs}-n^+\text{GaAs}-n^0\text{GaInAs}-\text{Au}$ -структуры, построенная на основе полученных данных, приведена на **рис. 3**.

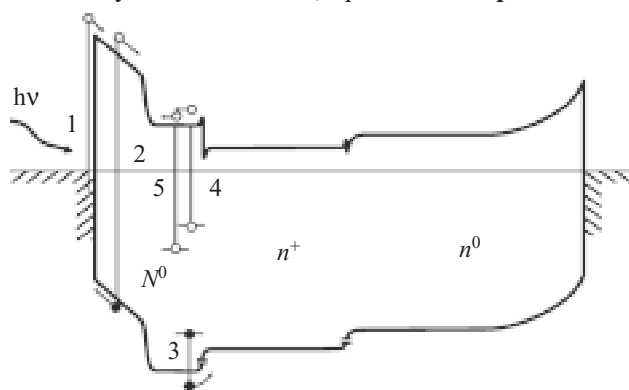


Рис. 3. Энергетическая зонная диаграмма $\text{Ag}-N^0\text{AlGaAs}-n^+\text{GaAs}-n^0\text{GaInAs}-\text{Au}$ -структуры в равновесном состоянии

В соответствии с поведением изотипных $N-n$ -гетеропереходов, узкозонная область ведет себя как полупроводник p -типа [9]. На этих $N-n$ -гетеропереходах смещающему прямому направлению соответствует отрицательный потенциал на $(-)\text{Ag}-N^0\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ -стороне, когда барьер $\text{Ag}-N^0\text{AlGaAs}$ принимает запираемое положение. Эквивалентную

схему исследуемой структуры можно представить в виде $m-N^0-p$ -перехода, состоящего из прямо включенных двух барьеров с двумя последовательно соединенными через n^+ -подложку базовыми областями.

В связи с тем, что концентрация носителей $n^+\text{GaAs}$ подложки на три порядка выше, чем в эпитаксиальных слоях, а сопротивление очень мало, то подложка в структуре становится связующим звеном между гетерослоями. В процессах токопереноса его толщина практически не играет роли, т. к. все приложенное извне напряжение падает на гетерослоях и в потенциальных барьерах «металл—полупроводник». Общая толщина, которая участвует в физических процессах, равна сумме толщин гетерослоев.

Ниже приведены результаты исследования фотовольтаического эффекта в спектральном диапазоне 0,4—2 мкм, обнаруженного при комнатной температуре в двухбазовой $\text{Ag}-N^0\text{AlGaAs}-n^+\text{GaAs}-n^0\text{GaInAs}-\text{Au}$ -структуре.

Фотовольтаический эффект в двухбазовой структуре

При исследовании спектральных характеристик двухбазовой $\text{Ag}-N^0\text{AlGaAs}-n^+\text{GaAs}-n^0\text{GaInAs}-\text{Au}$ -структуры в режиме тока короткого замыкания обнаружен фотовольтаический эффект, т. е. без подачи рабочего напряжения в замкнутой цепи создается фототок при возбуждении монохроматическим и интегральным излучением. Особенность обнаруженного эффекта состоит в том, что при освещении со стороны $\text{Ag}-N^0\text{AlGaAs}$ с увеличением длины волны монохроматического излучения от 0,4 до 2 мкм фототок меняет знак. Если в области собственного поглощения (0,5—0,9 мкм) фототок имеет положительный знак, то в примесной области поглощения (от 0,96 до 2 мкм) фототок приобретает отрицательную полярность с пиками при 1,1 и 1,55 мкм (**рис. 4**). Наблюдаемые пики при 1,1 мкм можно идентифицировать с энергетическими уровнями центров собственных дефектов эпитаксиальных слоев базовой области, а пики при 1,55 мкм связаны с уровнями кислорода (0,8—0,82 мкм). При возбуждении структуры со стороны $n\text{GaInAs}-\text{Ag}$ максимум фототока короткого замыкания достигается в области спектра 0,94 мкм, соответствующей ширине запрещенной зоны GaInAs (1,32 эВ). Однако в примесной области фототоки имеют низкие значения.

С повышением температуры от комнатной до 80°C значения фототока в области собственного поглощения остаются неизменными, а в примесной области поглощения — увеличиваются пропорционально температуре (**рис. 4**, кривые 2 и 4). Неизменность величины фототока в области собственного поглощения можно объяснить независимостью физических процессов (прежде всего — толщины слоя объемного заряда $\text{Ag}-N^0\text{AlGaAs}$ -барьера) от температуры. Смену знака спектрального фототока можно объяснить сменой области фотогенерации носителей в соответствии с длиной волны оптического излучения. Так, излучение с длиной волны от 0,4 до 0,94 мкм генерирует фотоносители в приповерхностной области и в области объемного заряда облучаемого барьера

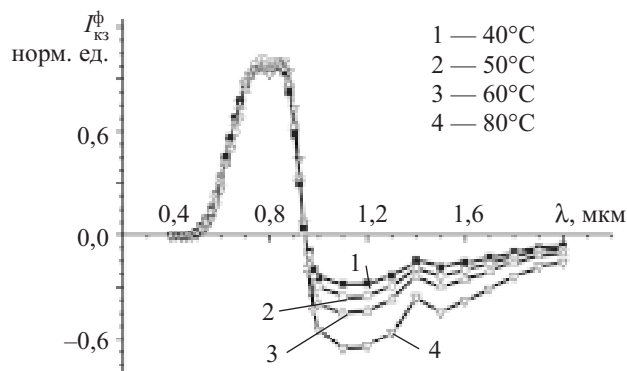


Рис. 4. Спектральная характеристика $\text{Ag-N}^0\text{AlGaAs-n}^+\text{GaAs-n}^0\text{GaInAs-Au}$ -структуры при различных температурах в режиме тока короткого замыкания при освещении со стороны $\text{Ag-N}^0\text{AlGaAs}$

(рис. 4, кривые 1 и 2). В дальнейшем излучение достигает квазинейтральной области базы и гетерограницы $\text{N}^0\text{AlGaAs-n}^+\text{GaAs}$, где фотоотклик имеет противоположный знак (рис. 3, позиции 3, 4 и 5). Позиция 3 соответствует возбуждению носителей с уровня собственных дефектов гетерослоя, а позиция 4 — разделению фотоносителей в области объемного заряда на гетерогранице $\text{N}^0\text{AlGaAs-n}^+\text{GaAs}$ и, наконец, позиция 5 отражает возбуждение фотоносителей с примесных уровней кислорода. В результате имеем смену знака фототока в режиме короткого замыкания в зависимости от длины волны возбуждающего оптического излучения.

Таким образом, в легированной кислородом двухбазовой $\text{Ag-N}^0\text{AlGaAs-n}^+\text{GaAs-n}^0\text{GaInAs-Au}$ -структуре при комнатной температуре обнаруживается фотовольтаический эффект, который сопровождается сменой знака фототока при переходе из области

собственного поглощения к примесному в диапазоне спектра от 0,4 до 2 мкм. Структура представляет интерес как бесшумный фотоприемник для волоконно-оптических систем.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Есеев Д. Г., Сеница С. П., Чернявский Е. В. Вольт-амперные характеристики фотоприемников с блокированной прыжковой проводимостью на основе Si:As // ФТП. — 1999. — Т. 33, вып. 5. — С. 614—618.
2. Слободчиков С. В., Салихов Х. М., Яковлев Ю. П., Саморуков Б. Е. О механизмах усиления фототока в изотипных гетероструктурах $\text{n}^+\text{-GaSb-n}^0\text{-GaInAsSb-n}^+\text{-GaAlAsSb}$ // Письма в ЖТФ. — 1998. — Т. 24, № 10. — С. 37—42.
3. Ахметоглы М. А., Андреев И. А., Куницына Е. В. и др. Электрические свойства изотипных гетеропереходов $\text{n}^+\text{-GaSb-n}^0\text{-GaInAsSb-n}^+\text{-GaAlAsSb}$ // ФТП. — 2007. — Т. 41, вып. 2. — С. 154—159.
4. Pat. 4568960 USA. Blocked impurity band detectors / M. D. Petroff, M. G. Stapelbroek. — 1986.
5. Van Opdorp C., Kanerva H. K. J. Current-voltage characteristics and capacitance of isotype heterojunctions // J. Solid-State Electron. — 1967. — Vol. 10, N 5. — P. 401—421.
6. Каримов А. В., Едгорова Д. М. Одно- и двухбарьерные структуры для оптоэлектроники // Электроника. — 2005. — № 11. — С. 5—13.
7. Karimov A. V., Yodgorova D. M. Features of growth epitaxial layers of firm solutions on a basis of indium's and aluminium's arsenide // Semiconductor Physics Quantum Electronics Optoelectronics. — 2004. — N 4. — P. 382—385.
8. Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах / Кн. 2. — М.: Мир, 1981.
9. Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах / Кн. 1. — М.: Мир, 1981.
10. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов / Кн. 1. — М.: Мир, 1984.
11. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника. — М.: Высш. школа, 1991.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

15-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов
«МИКРОЭЛЕКТРОНИКА И ИНФОРМАТИКА — 2008»
 23—25 апреля 2008 г.

Научные направления работы конференции

1. Нанотехнологии в электронике.
2. Материалы микро-, опто- и нанoeлектроники.
3. Проектирование и технология электронных компонентов.
4. Микро- и наносистемная техника.
5. Опто- и акустоэлектроника.
6. Математические модели и алгоритмы в информатике.
7. Автоматизированные информационные системы.
8. Информационно-управляющие и вычислительные системы и приборы.

9. Телекоммуникационные системы и связь.
10. Биомедицинская электроника.
11. Экологические аспекты микро- и нанoeлектроники.
12. Менеджмент и маркетинг наукоемких производств.

Адрес Оргкомитета

124498, Москва, г. Зеленоград, проезд 4806, д. 5, МИЭТ, ОНТИ.
 Тел. (495) 532-98-30
 E-mail: id@rnd.miee.ru

Ответственный секретарь Оргкомитета
 Харач Валентина Павловна

К. ф.-м. н. Д. МЕЛЕБАЕВ, Г. Д. МЕЛЕБАЕВА,
д. ф.-м. н. Ю. В. РУДЬ, д. ф.-м. н. В. Ю. РУДЬ

Туркменистан, г. Ашхабад, Туркменский гос. ун-т им. Магтымгулы;
Россия, г. Санкт-Петербург, Физико-технический ин-т им. А. Ф. Иоффе,
СПб гос. политехнический университет
E-mail: dmelebay@yandex.ru, yuryrud@mail.ioffe.ru, rudvas@spbstu.ru

Дата поступления в редакцию
12.07.2007 г.

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

СПЕКТРЫ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУР Ni–n-GaAs

Установлено, что фоточувствительные структуры Ni–n-GaAs при освещении со стороны полупрозрачного слоя никеля практически не реагируют на свет в фаулеровской области спектра $h\nu=0,9\ldots 1,25$ эВ.

Фоточувствительные структуры на основе арсенида галлия с барьером Шоттки являются одними из наиболее перспективных структур для создания быстродействующих и радиационно стойких полупроводниковых приборов, используемых в современной опто- и микроэлектронике [1]. В работе [2] показана возможность создания силовых диодов с барьером Шоттки на основе структур Ni–n-GaAs, изготовленных химическим методом. Экспериментальное исследование спектра фоточувствительности поверхностно-барьерных структур Ni–n-GaAs говорит о возможности создания на их основе новых фотоэлектрических полупроводниковых приборов [3, 4].

Вопрос о том, как вычислить высоту барьера Шоттки (φ_{B0}) на контакте «металл (m)–полупроводник (s)», является, несмотря на многолетние исследования, актуальной задачей теории полупроводников [5]. В данном контексте несомненный интерес представляют фоточувствительные поверхностно-барьерные структуры Ni–n-GaAs. Высота барьера таких структур в основном определяется вольт-амперным и вольт-фарадным методами [6], а фотоэлектрический метод [7], основанный на измерении спектра фототока при освещении структур со стороны полупрозрачного слоя никеля, практически не применяется.

В работе [8] была сделана попытка определить высоту барьера для структур Ni–n-GaAs при освещении со стороны полупрозрачного никеля. Однако в фаулеровской области спектра ($h\nu=0,9\ldots 1,25$ эВ) чувствительности у структуры не было. Причина этого явления в литературе не обсуждалась. С целью выяснения этого вопроса мы использовали метод сравнения спектра фототока исследуемых структур Ni–n-GaAs и контрольных структур Au–n-GaAs при идентичных условиях эксперимента.

В настоящей работе исследуются спектры фоточувствительности структур Ni–n-GaAs и Au–n-GaAs

при освещении m – s -перехода со стороны полупрозрачного слоя металла в диапазоне энергий фотонов $h\nu=0,9\ldots 2,3$ эВ. Одновременно сравниваются спектры фоточувствительности Ni–n-GaAs и Au–n-GaAs в указанном диапазоне энергий фотонов для выяснения причины отсутствия фототока структур Ni–n-GaAs в фаулеровской области спектра.

Объектом исследования служили структуры Ni–n-GaAs/ n^+ -GaAs и Au–n-GaAs/ n^+ -GaAs. В качестве подложек использовались n^+ -GaAs ($n^+=8\cdot 10^{17}$ см $^{-3}$) пластинки толщиной примерно 250 мкм, изготовленные методом Чохральского. Активные слои n-GaAs ($n=N_d-N_a=(2\ldots 4)\cdot 10^{15}$ см $^{-3}$) толщиной 20–40 мкм выращивались методом жидкостной эпитаксии [9]. Омический контакт к подложке n^+ -GaAs изготовлялся сплавлением сплава, содержащего In+3%Te в атмосфере очищенного водорода при температуре около 500°C. Полупрозрачный барьерный контакт к активному эпитаксиальному слою n-GaAs создавался химическим нанесением слоя Ni по методике [8].

Никель осаждался из водного раствора сульфат-диаммония-никеля $[\text{Ni}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}]$ и сульфат-гидразиния $[(\text{N}_2\text{H}_6)\cdot \text{SO}_4]$. Температура осаждения 90–95°C. Нашатырный спирт (NH_4OH) добавлялся до pH=10. Контрольный образец Au–n-GaAs на основе эпитаксиальных структур также создавался химическим осаждением слоя золота из водного раствора HAuCl_4 (4 г/л)+HF (100 мл/л) при комнатной температуре [10]. Толщина слоя никеля и золота, по эллипсометрическим данным, составляла 160–250 Å. Перед химическим осаждением слоя никеля либо золота поверхность эпитаксиальных слоев n-GaAs обрабатывалась в бром-метилом травителе 4%Br $_2$ + 96%CH $_3$ OH [11].

Площадь барьерного контакта (S) у разных структур составляла 0,03–0,1 см 2 . К омическому и барьерному контактам с использованием индия припаивались серебряные провода.

Исследуемые Ni–n-GaAs- и контрольная Au–n-GaAs-структуры (см. таблицу) обладали фоточувствительностью при освещении со стороны полупрозрачного слоя металла (Ni, Au). Измерялись вольт-фарадные ($C-U$) характеристики и спектр фототока короткого замыкания ($I_{\text{ф}}-h\nu$). Все измерения выполнены при комнатной температуре (300 K).

Публикуется в качестве дискуссионной. Работа поддержана программой ОФН РАН «Новые принципы преобразования энергии в полупроводниковых структурах».

Параметры энергетических диаграмм структур
«металл—полупроводник GaAs»

Структура	S , см ²	N_d-N_a , см ⁻³	E_{m0} , В/см	$q\Phi_{B0}$, эВ ($C-U$)	$q\Phi_{B0}$, эВ ($I_0-h\nu$)**
1. Ni-n-GaAs	0,055	$2,1 \cdot 10^{15}$	$2,0 \cdot 10^4$	0,900	—
2. Ni-n-GaAs	0,050	$2,0 \cdot 10^{15}$	$1,9 \cdot 10^4$	0,901	—
3. Ni-n-GaAs	0,054	$2,6 \cdot 10^{15}$	$2,2 \cdot 10^4$	0,895	—
4. Au-n-GaAs*	0,048	$3,6 \cdot 10^{15}$	$2,8 \cdot 10^4$	0,887	0,89

* — контрольная структура; ** — освещение производилось со стороны полупрозрачного слоя металла.

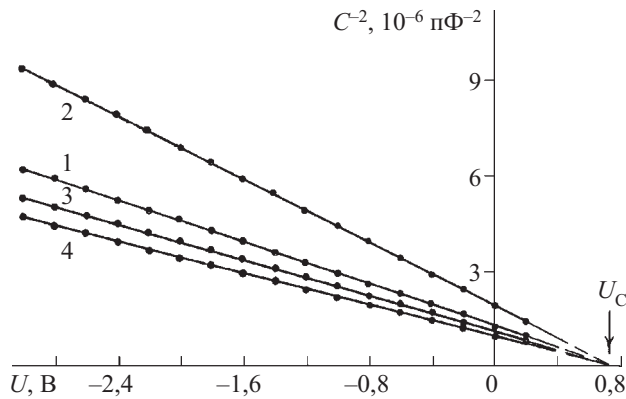


Рис. 1. Экспериментальная зависимость квадрата обратной дифференциальной емкости C^{-2} от напряжения U $m-s$ -структур Ni-n-GaAs (1—3) и Au-n-GaAs (4) при комнатной температуре (обозначения графиков соответствуют номерам структур в таблице)

Для определения параметров энергетической диаграммы структур «металл—полупроводник GaAs» измерялись вольт-фарадные характеристики на частоте 1 МГц. Зависимость дифференциальной барьерной емкости C от напряжения на потенциальном барьере U в координатах $1/C^2-U$ ($U=-3,0...+0,4$ В) для всех исследованных структур линейная (рис. 1), что соответствует теории Шоттки. Это позволило определить высоту барьера Шоттки ($q\Phi_{B0}$) непосредственно из значения емкостного напряжения отсечки U_C :

$$q\Phi_{B0} = qU_D - \mu = qU_C + kT - \mu,$$

где U_D — диффузионный потенциал;

μ — энергия уровня Ферми в объеме полупроводника, отсчитанная от дна зоны проводимости.

Величина напряжения отсечки, полученная как точка пересечения графиков этой зависимости с осью абсцисс, составляла $U_0^C = U_C = 0,74$ В. Для структур Ni-n-GaAs и Au-n-GaAs значение U_C оказалось одинаковым (см. рис. 1) при незначительном изменении концентрации N_d-N_a . Разность концентраций ионизованных доноров и акцепторов (N_d-N_a), определенная из $C-U$ -характеристики, и значения высоты барьера $q\Phi_{B0}$ для разных исследованных GaAs $m-s$ -структур приведены в таблице.

Спектр фототока короткого замыкания Ni-n-GaAs- и Au-n-GaAs-структур измерялся с помощью монохроматора ДМР-4, источником служила лампа СИ-8-200. Высокая чувствительность в области спек-

тра 1—2,8 эВ достигалась применением системы синхронного детектирования. Абсолютное значение квантовой эффективности исследованных фотодиодных структур в области энергии фотонов $h\nu = 1...2,3$ эВ определялось с помощью эталонных фотоприемников, откалиброванных в интервале 1—5,4 эВ. Полученные фотодиоды Шоттки, согласно данным измерений стационарных вольт-амперных характеристик, можно отнести к идеальным ($\beta < 1,1$), максимальная фоточувствительность (S_p , А/Вт) которых при освещении со стороны полупрозрачного металла (Ni, Au) для разных структур находится в пределах 0,11—0,15 А/Вт ($h\nu = 2,2$ эВ). В спектральных измерениях освещаемая площадь $m-s$ -перехода составляла примерно 0,01 см². (Фототок приведен к равному числу падающих фотонов.)

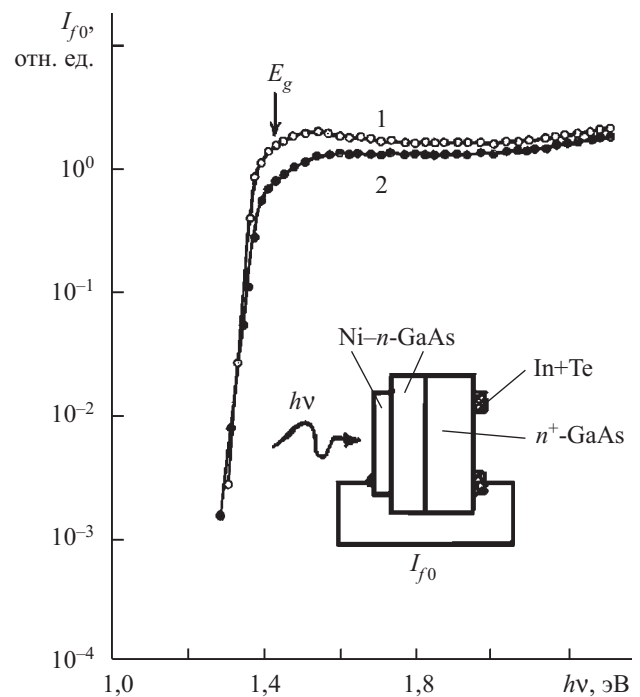


Рис. 2. Зависимость фототока (I_0) от энергии фотонов ($h\nu$) для $m-s$ -структур 1 и 2 (см. табл.) при комнатной температуре. На вставке схема измерения фототока короткого замыкания I_0 в структурах 1 и 2

Типичные спектральные характеристики фоточувствительных структур Ni-n-GaAs в области энергии фотонов 1,3—2,3 эВ при освещении со стороны полупрозрачного слоя Ni представлены на рис. 2. Здесь видно, что фоточувствительность структур Ni-n-GaAs при значениях энергии фотонов $h\nu$, близких (и больших) к ширине запрещенной зоны E_g ($h\nu = 1,3... 2,3$ эВ), обусловлена возбуждением электронно-дырочных пар в полупроводнике (GaAs) и разделением их полем поверхностного потенциального барьера (E_{m0}).

По зависимости I_0 от $h\nu$ [12] на этом участке определена ширина запрещенной зоны n -GaAs (рис. 2 и 3), и она составляет 1,43 эВ при 300 К. Спектр фототока при значениях энергии фотонов $h\nu > E_g$ для структур Ni-n-GaAs изучался в [4], а для структур

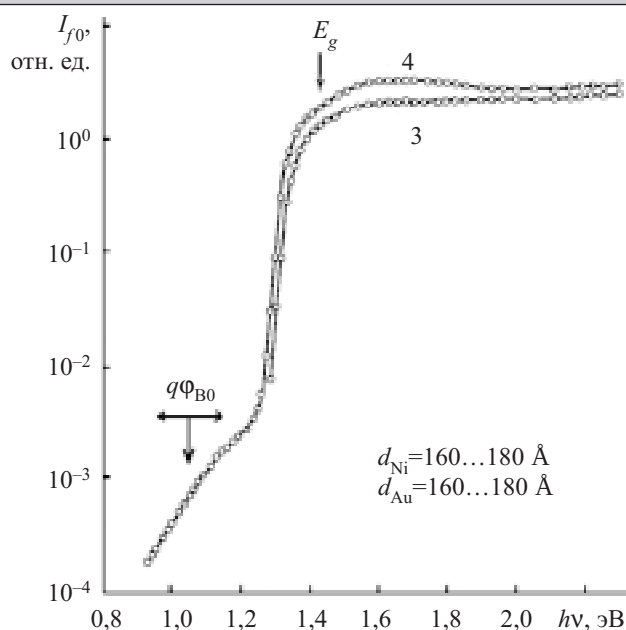


Рис. 3. Спектр фототока короткого замыкания m - s -структур Ni- n -GaAs (3) и Au- n -GaAs (4) (см. табл.) при комнатной температуре

Au- n -GaAs — в [13], и в настоящей работе не рассматривается.

Как известно [14], если энергия фотонов $h\nu$ больше высоты барьера $q\Phi_{B0}$, но меньше E_g , фоточувствительность структур Ni- n -GaAs должна быть обусловлена фотоэмиссией электронов из никеля в арсенид галлия, и для этого участка должно выполняться соотношение $I_{f0} \sim (h\nu - q\Phi_{B0})^2$. Как показал эксперимент (рис. 2), при освещении структур Ni- n -GaAs со стороны слоя никеля фотонами с энергией $h\nu < 1,3$ эВ в слое никеля не создаются возбужденные электроны (эмиссии электронов из металла и перехода их в полупроводник не происходит). Это наблюдается в нескольких Ni- n -GaAs-структурах (рис 2, кривые 1, 2; рис 3, кривая 3).

Для объяснения обнаруженных явлений проведен сравнительный анализ спектров фототока короткого замыкания структур Ni- n -GaAs и Au- n -GaAs (рис. 3) при освещении со стороны полупрозрачного слоя металла (Ni, Au).

Из литературы (например [13]) известно, что в контрольных структурах Au- n -GaAs полупрозрачный слой золота пропускает ближнее инфракрасное излучение ($h\nu = 0,8 \dots 1,3$ эВ). Однако такое пропускание у пленки никеля в структурах Ni- n -GaAs не известно, и для этих структур высота барьера при освещении со стороны слоя Ni никем не была определена. Поэтому в данной работе особое внимание уделяется исследованию фоточувствительности в фаулеровской области спектра.

Результаты измерений фототока I_{f0} показали, что структуры Ni- n -GaAs (рис. 3, кривая 3) практически не чувствуют света в фаулеровской области спектра ($h\nu = 0,9 \dots 1,25$ эВ). Поэтому оказалось невозможным определить $q\Phi_{B0}$ для Ni- n -GaAs-структур при освещении со стороны слоя никеля по закону Фаулера. В силу этого в литературе отсутствуют данные

о высоте барьера $q\Phi_{B0}$ этих структур, полученные методом фотоответа [14, 15].

Корректность измерений фототока I_{f0} в указанной области спектра была подтверждена на структурах Au- n -GaAs (рис. 3, кривая 4), фоточувствительных в фаулеровской области спектра. Зависимость I_{f0} от $h\nu$ в последнем случае подчиняется закону Фаулера $I_{f0} \sim (h\nu - q\Phi_{B0})^2$.

Из этой зависимости определена величина $q\Phi_{B0} = 0,89$ эВ для структуры Au- n -GaAs (рис. 4). Найденное значение высоты барьера Шоттки для Au- n -GaAs при освещении со стороны Au хорошо согласуется с данными [16], полученными по методу фотоответа при освещении m - s -перехода со стороны GaAs.

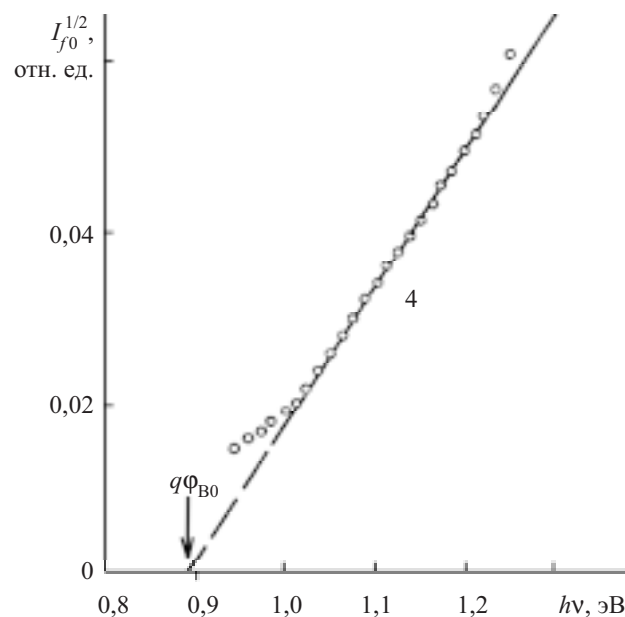


Рис. 4. Зависимость фототока ($I_{f0}^{1/2}$) от энергии фотонов ($h\nu$) для m - s -структуры Au- n -GaAs (4) при комнатной температуре

Как показали сравнительные эксперименты, отсутствие фототока в структурах Ni- n -GaAs в основном связано с тем, что при освещении со стороны полупрозрачного слоя Ni падающий свет с энергией фотонов $h\nu = 0,9 \dots 1,25$ эВ сильно отражается от зеркальной поверхности слоя никеля (рис. 3), т. е. поглощения в тонком слое никеля не происходит [17]. При данном направлении освещения традиционное объяснение фотоэффекта [14] в фаулеровской области спектра для барьерных контактов Ni- n -GaAs не может быть использовано.

Таким образом, впервые [17] экспериментально установлено, что при освещении структур Ni- n -GaAs со стороны полупрозрачного слоя Ni фотоны с энергией $h\nu = 0,9 \dots 1,25$ эВ не поглощаются в слое Ni, и эмиссии электронов из слоя Ni в GaAs не происходит, в связи с чем в структуре Ni- n -GaAs отсутствует фототок в фаулеровской области спектра. По-видимому, поэтому в известной книге С. М. Зи [15] и давно известной работе С. А. Мида [14] не приведе-

но значение $q\Phi_{B0}$ для структур Ni-n-GaAs, определенное фотоотчетом при освещении со стороны полупрозрачного слоя Ni.

Результаты данных исследований могут быть полезны при создании поверхностно-барьерных солнечных элементов на основе Ni-n-GaAs-структур, поскольку тонкие слои Ni одновременно могут выполнять функции барьерного контакта и предупреждать разогрев солнечного элемента от ближнего инфракрасного излучения Солнца с энергией фотонов $h\nu < 1,3$ эВ.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Арсенид галлия в микроэлектронике / Под ред. Н. Айнспрука, У. Уиссмана.— М.: Мир, 1988.
2. Ашкинази Г. А., Жилиев Ю. В., Шульга М. И., Челноков В. Е. Силовые диоды с барьером Шоттки на арсениде галлия // Письма в ЖТФ.— 1983.— Т. 9, вып. 7.— С. 414—417.
3. Конников С. Г., Мелебаева Г. Д., Мелебаев Д. и др. Полярметрические свойства поверхностно-барьерных структур Ni-n-GaAs // Письма в ЖТФ.— 1992.— Т. 18, вып. 24.— С. 32—37.
4. Гольдберг Ю. А., Константинов О. В., Лантратов В. М. и др. Сравнение температурных зависимостей квантовой эффективности фотоэлектронпреобразования p-n-структур и диодов Шоттки на основе GaAs // ФТП.— 1999.— Т. 33, вып. 7.— С. 876—879.
5. Давыдов С. Ю., Лебедев А. А., Посредник О. В., Таиров Ю. М. Контакт металл—карбид кремния: зависимость высоты барьера Шоттки от политипа SiC // Там же.— 2001.— Т. 35, вып. 12.— С. 1437—1439.
6. Вяткин А. П., Максимова Н. К., Поплавной А. С. и др. Поверхностно-барьерные переходы в арсениде галлия и роль тамбовских состояний в их образовании // Там же.— 1970.— Т. 4, вып. 5.— С. 915—922.
7. Crowell C. R., Spitzer W. G., White H. G. Photooxidized holes running in Au // Appl Phys. Letter.— 1962.— Vol. 1.— P. 3—6.
8. Мелебаева Г. Д., Мелебаев Д., Агаев Я. и др. Спектр фоточувствительности поверхностно-барьерных структур никель—арсенид галлия, изготовленных химическим методом // Мат-лы 11-й Всесоюз. конф. по фотоэлектрическим явлениям в полупроводниках.— Ашхабад.— 1991.— С. 200—201.
9. Беркелиев А., Мелебаев Д. Фотоэлектрические свойства поверхностно-барьерных структур Au-n-Ga_{1-x}Al_xAs в области энергий фотонов 1—5 эВ // Изв. АН ТССР. Сер. ФТХиГН.— 1977.— Вып. 1.— С. 96—98.
10. Беркелиев А., Гольдберг Ю. А., Мелебаев Д., Царенков Б. В. Фотоприемник видимого и ультрафиолетового излучения на основе GaAs_{1-x}P_x поверхностно-барьерных структур // ФТП.— 1976.— Т. 10, вып. 8.— С. 1532—1534.
11. Беркелиев А., Гольдберг Ю. А., Именков А. Н. и др. Фотоэлектрический эффект в варизонных поверхностно-барьерных структурах // Там же.— 1978.— Т. 12, вып. 1.— С. 96—101.
12. Мелебаев Д., Мелебаева Г. Д., Рудь Ю. В., Рудь В. Ю. Новые возможности фотоэлектрического метода определения высоты барьера в структурах Au-n-GaAs // Технология и конструирование в электронной аппаратуре (ТКЭА).— 2007.— № 3.— С. 33—37.
13. Гуткин А. А., Дмитриев М. В., Наследов Д. Н., Пашковский А. В. Спектры фоточувствительности поверхностно-барьерного диода Au-n-GaAs в области энергий фотонов 1—5 эВ // ФТП.— 1971.— Т. 5, вып. 10.— С. 1927—1932.
14. Mead C. A. Metal-semiconductor surface barrier // Solid-State Electron.— 1966.— Vol. 9, N 11/12.— P. 1023—1033.
15. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов.— М.: Энергия, 1973.
16. Мелебаев Д., Мелебаева Г. Д., Рудь Ю. В., Рудь В. Ю. Определение высоты барьера Шоттки Au-n-GaAs фотоэлектрическим методом // Труды VII Междунар. науч.-практ. конф. «СИЭТ-2006». Т. II.— Одесса, Украина.— 2006.— С. 165.
17. Мелебаева Г. Д., Мелебаев Д., Рудь Ю. В., Рудь В. Ю. Спектр фототока структуры Ni-n-GaAs // Труды VIII Междунар. науч.-практ. конф. «СИЭТ-2007».— Одесса, Украина.— 2007.— С. 346.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ



3-я Международная специализированная выставка оптической, лазерной и оптоэлектронной аппаратуры
"ФОТОНИКА-2008"
 11—13 марта 2008 г.

Основные разделы выставки

- ✦ Оптика, оптические приборы и системы
- ✦ Оптоволоконное оборудование, инструменты и комплектующие
- ✦ Лазеры, лазерные системы и лазерная безопасность
- ✦ Источники света, светоизлучающие диоды, осветительная аппаратура
- ✦ Оптомеханические приборы и оборудование
- ✦ Сенсоры, детекторы, контрольно-измерительная аппаратура
- ✦ Системы нанесения, обработки и передачи изображений
- ✦ Микроскопия, спектроскопия, оптическая томография
- ✦ Аналитическая аппаратура для медико-биологических исследований
- ✦ Лазерно-оптическая медицинская техника
- ✦ Сервисные и консультационные услуги

Организаторы

ЗАО "Экспоцентр"
 Лазерная ассоциация

при поддержке и содействии

Федерального агентства по науке и инновациям, Федерального агентства по промышленности Правительства Москвы, Технологического центра Союза немецких инженеров, Европейского оптического общества, Государственного комитета по науке и технологиям Республики Беларусь

Место проведения

Москва, Выставочный комплекс
 ЗАО "Экспоцентр" на Красной Пресне
www.photonics-expo.ru

К. т. н. А. С. ТУРЦЕВИЧ

Республика Беларусь, г. Минск, Завод «Транзистор»
E-mail: Aturtsevich@transistor.com.byДата поступления в редакцию
11.10.2007 г.Оппонент д. ф.-м. н. Н. И. КЛЮЙ
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛУИЗОЛИРУЮЩЕГО КРЕМНИЯ
ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПРИБОРОВ*Исследовано влияние условий осаждения на структуру и электрофизические свойства пленок поликристаллического кремния, легированного кислородом. Результаты использованы при изготовлении изделий силовой электроники.*

Использование пленок полуизолирующего кремния (поликристаллического кремния, легированного кислородом — ПКЛК) позволяет исключить образование паразитных каналов и повысить пробивное напряжение дискретных высоковольтных приборов [1—3], т. к. в них полностью отсутствует характерный для пленок диоксида кремния эффект захвата инжектированных в процессе лавинного пробоя горячих носителей, который вызывает деградацию вольт-амперных и шумовых характеристик приборов. Кроме того, пленки полуизолирующего кремния могут использоваться для формирования высокоомных резисторов — вместо поликремниевых резисторов, которые имеют большой разброс величины сопротивления и высокий температурный коэффициент [4, 5]. Состав, структура и свойства пленок, полученных химическим осаждением из газовой фазы, существенно зависят от начальной стадии роста пленок [6].

Формирование слоев путем окисления SiH_4 азотом протекает по сложному многостадийному реакционному маршруту [7, с. 90—144]. Электрические свойства пленок полуизолирующего кремния зависят от их структуры и содержания в них кислорода. Однако структура и электрофизические свойства пленок полуизолирующего кремния изучены недостаточно полно.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния соотношения потоков $\text{N}_2\text{O}/\text{SiH}_4$ в реакторе на начальную стадию роста, структурно-морфологические и электрофизические свойства осаждаемых пленок полуизолирующего кремния.

Методика проведения эксперимента

Осаждение слоев в системе $\text{SiH}_4\text{--N}_2\text{O}$ осуществляли в промышленном горизонтальном реакторе пониженного давления «Карат» с горячими стенка-

ми. Температура осаждения $t_{\text{ос}}$ поликристаллического кремния (ПК) составляла 620°C , а при осаждении ПКЛК — 650°C . Давление при осаждении ПК составляло 33 Па, при осаждении ПКЛК — 24 Па. Температурный профиль поддерживался с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$. Использовались моносилан и закись азота электронного класса чистоты. Величину отношения объемных потоков закиси азота к моносилану (γ) варьировали в диапазоне 0,05—3,0.

В качестве подложек использовали пластины кремния диаметром 100 мм с ориентацией (100) и удельным сопротивлением 12 Ом·см, легированные бором (КДБ). На части образцов предварительно выращивали термический оксид кремния толщиной $42,5 \pm 2,5$ нм. Расстояние между подложками составляло 2,8 мм.

Показатель преломления (n) пленок определяли при помощи лазерной эллипсометрии. Толщина пленок измерялась при помощи спектрофотометра MPV SP фирмы Leits. Для исследования ИК-спектров поглощения использовали спектрометр «SPECORD-75». Содержание кислорода определяли при помощи оже-спектрометрии на установке РН-660. Плотность пленок определялась методом полного внешнего отражения рентгеновских лучей при помощи дифрактометра ДТС.

Структурно-морфологические свойства пленок исследовали методами просвечивающей электронной микроскопии с помощью угольных реплик и электронографического анализа. Величину «эффективной» энергии активации определяли из графиков Аррениуса для различных величин γ по стандартной методике. Начальная стадия роста пленок ПК и ПКЛК исследовалась при помощи просвечивающей электронной микроскопии методом угольных реплик и электронографического анализа. Также выполнялась просвечивающая микроскопия поперечных сечений образцов.

Кроме того, для исследования начальной стадии роста пленок ПК и ПКЛК использовалась зондовая нанолaborатория ItegraPrima (атомно-силовой микроскоп (АСМ)) фирмы NT MDT с горизонтальным разрешением 1 нм и вертикальным разрешением 0,1 нм в полуконтактном режиме и режиме фазового изображения.

Режим фазового изображения отличается от полуконтактного тем, что в последнем, за счет обратной связи по высоте, удерживается постоянная амплитуда исходных колебаний зонда. Это

Автор выражает благодарность руководству НПО «Интеграл», а также О. Ю. Наливайко, Г. В. Лепешкевичу, В. П. Лесниковой, Н. Г. Циркуновой, Г. Г. Чигирю за поддержку и помощь.

позволяет фиксировать изменения рельефа поверхности. Если поверхность неоднородна, т. е. содержит несколько материалов, то сила взаимодействия между зондом и образцом будет различна, и при постоянной амплитуде колебаний зонда будет происходить сдвиг фазы сигнала относительно опорного (исходного). На этом принципе основан режим фазового изображения.

Удельное сопротивление пленок определялось при помощи индиевого зонда ($S=0,005 \text{ см}^2$) путем измерения ВАХ в широком диапазоне напряжения (для расчета использовался линейный участок ВАХ).

Результаты и обсуждение

Влияние температуры на скорость осаждения характеризуется энергией активации (E_a). На рис. 1, а, б представлены зависимости эффективной энергии активации процесса осаждения слоев в системе $\text{SiH}_4\text{--N}_2\text{O}$ и показателя преломления от γ , а в таблице — данные по E_a различных авторов [7—11].

Как видно из рис. 1, а и таблицы, в диапазоне величин γ от 0,05 до 0,3 величина E_a сначала умень-

шается от 1,18 до 0,82 эВ при $\gamma=0,15$, а затем повышается до 0,96 эВ при $\gamma=0,2$ и до 1,67 при $\gamma=0,3$. При осаждении нелегированных пленок кремния ($\gamma=0$) E_a составляет 1,7 эВ [2]. В диапазоне γ от 0,3 до 1,0 величина E_a выходит на насыщение и составляет 1,67 эВ для температурного диапазона 650—700°C.

Таким образом, подобно процессу осаждения поликристаллического кремния, легированного фосфором в процессе роста, эффективная энергия активации процесса осаждения слоев в системе $\text{SiH}_4\text{--N}_2\text{O}$ зависит от γ . Или, другими словами, температурная зависимость скорости осаждения слоев в системе $\text{SiH}_4\text{--N}_2\text{O}$ определяется величиной γ . Граничное значение γ , при котором происходит изменение кинетики процесса осаждения, находится в диапазоне 0,15...0,3.

Величина показателя преломления получаемых пленок с увеличением γ монотонно уменьшается от 3,7 (для пленок нелегированного поликремния она

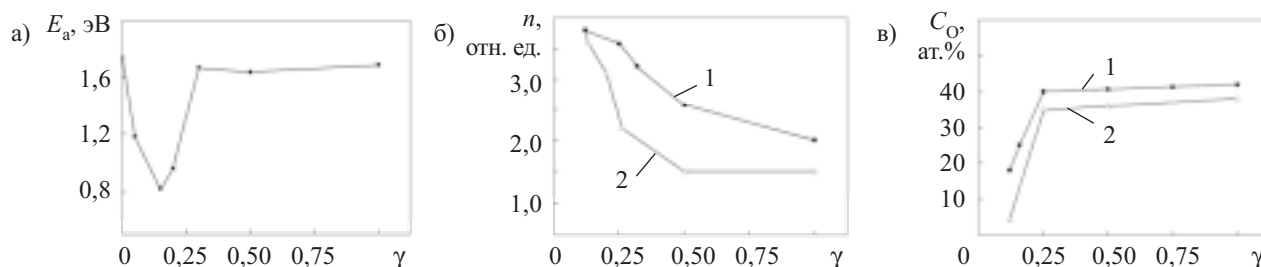


Рис. 1. Зависимость энергии активации процесса осаждения (а), показателя преломления (б) и содержания кислорода (C_O) в ПКЛК (в) от величины γ : 1 — $t_{oc}=650^\circ\text{C}$, 2 — $t_{oc}=750^\circ\text{C}$ [13]

Сопоставление величин эффективной энергии активации процесса осаждения пленок ПКЛК в системе «моносилан—закись азота» в реакторе пониженного давления

γ , отн. ед.	Энергия активации, эВ	Давление при осаждении	Температурный диапазон, °C	Тип слоя	Источник информации	Примечания
50	2,0	Атмосферное	560—800	SiO_2	[7]	Изотермический реактор атмосферного давления (РАД), $\text{SiH}_4\text{--N}_2\text{O}$
0 0,2 0,4	1,86 1,08 0,76	16,0 Па	600—680	ПКЛК	[11]	$\text{SiH}_4\text{--N}_2\text{O}$, горизонтальный реактор пониженного давления (РПД)
0	1,74	50,0 Па	550—680	ПК	[12]	SiH_4 , вертикальный РПД
50	1,85	85—2400 Па	650—670	SiO_2	[9]	$\text{SiH}_4\text{--N}_2\text{O}$, горизонтальный РПД
0,05 0,20 0,4 0,6	1,18 1,71 1,71 2,71	1200—4220 Па	640—670	ПКЛК SiO_2	[10]	$\text{SiH}_4\text{--N}_2\text{O}$, горизонтальный РПД
400 400 10 400	1,80 0,99 1,94 1,31	Атмосферное	495—650 650—690 590—690 495—590	SiO_2 SiO_2 SiO_2 SiO_2	[8]	РАД, $\text{SiH}_4\text{--N}_2\text{O}$ $\text{Si}_2\text{H}_6\text{--N}_2\text{O}$
0,05 0,15 0,20 0,30 0,50 1,00	1,18 0,82 0,96 1,67 1,64 1,69	55 Па	650—750	SiO_2	[13]	$\text{SiH}_4\text{--N}_2\text{O}$, горизонтальный РПД

составляет 3,85 [14]) до значений, характерных для пленок диоксида кремния — 1,45 (рис. 1, б). Причем по мере увеличения температуры осаждения до 750°C изменение показателя преломления происходит более резко. Так, при температуре осаждения 650°C уменьшение величины n от 3,7 до 1,7 происходит при увеличении γ от 0,05 до 3,0, а при $t_{oc}=750^\circ\text{C}$ уменьшение n от 3,7 до 1,45 наблюдается при изменении величины γ от 0,05 до 0,5.

Результаты оже-анализа содержания кислорода в ПКЛК представлены на рис. 1, в. Видно, что при увеличении γ концентрация кислорода в ПКЛК монотонно возрастает.

При $t_{oc}=650^\circ\text{C}$ и изменении γ от 0,15 до 0,5 концентрация кислорода увеличивается от 16,7 до 40 ат.%, т. е. величина x в SiO_x увеличивается от 0,20 до 0,67, а затем медленно возрастает до 57 ат.% ($x=1,32$) при увеличении γ до 3,0. При $t_{oc}=750^\circ\text{C}$ концентрация кислорода быстро достигает значения 40—45 ат.% ($x=0,6\dots 0,7$) и при дальнейшем увеличении изменяется медленнее.

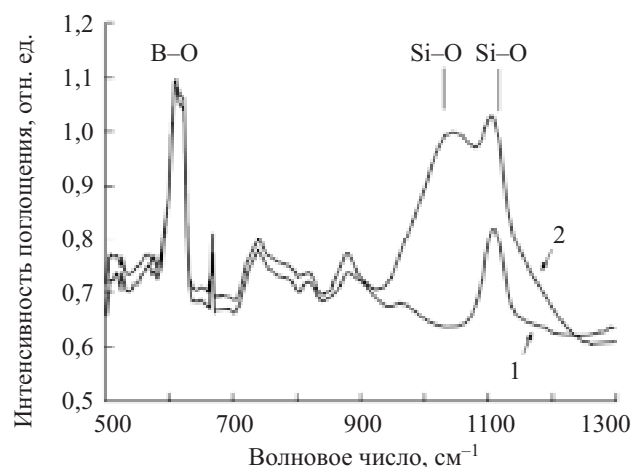


Рис. 2. ИК-спектры поглощения:

1 — подложка КДБ; 2 — пленка ПКЛК на подложке КДБ

На рис. 2 представлены ИК-спектры поглощения исходной подложки КДБ и пленки ПКЛК, осажденной на данную подложку. Видно, что после осаждения пленки ПКЛК на кремниевую подложку в спектре появляется характерный пик связи Si—O (1042 см^{-1}) в дополнение к пику Si—O (1105 см^{-1}), характеризующему межзольный кислород в подложке. Положение нового пика отличается от положения пика связи Si—O в пленках оксида кремния и борофосфоросиликатного стекла (1072—1090 см^{-1}).

Плотность пленок ПКЛК во всем исследованном диапазоне t_{oc} и γ составила 2,2—2,3 г/см^3 , что хорошо согласуется с данными, полученными в работе [15].

Таким образом, при $t_{oc}=650^\circ\text{C}$ в диапазоне γ от 0,05 до 1,0 происходит образование пленок ПКЛК, а при $\gamma>1,0$ — пленок переходного состава SiO_x , близких к SiO_2 . По мере увеличения температуры осаждения до 750°C область γ , в которой происходит образование ПКЛК, сужается, т. е. при $t_{oc}=650^\circ\text{C}$ процесс осаждения является более управляемым по содержанию кислорода.

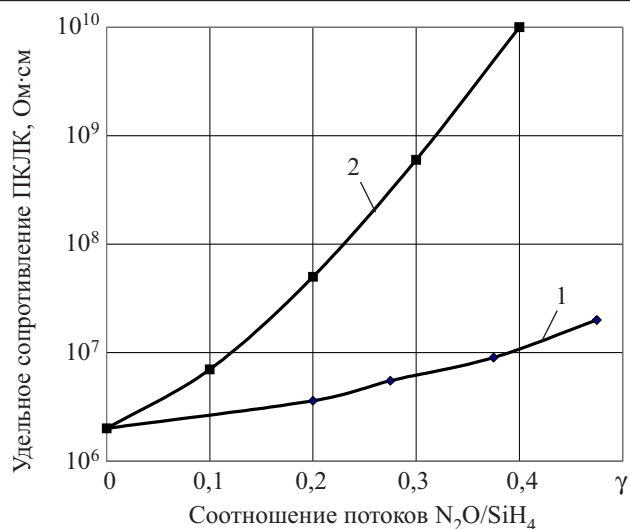


Рис. 3. Зависимость величины удельного сопротивления пленок полуизолирующего кремния от соотношения потоков $\text{N}_2\text{O}/\text{SiH}_4$:

1 — $P=24$ Па [16]; 2 — атмосферное давление [3]

Удельное сопротивление пленок ПКЛК, полученных при атмосферном давлении [3, с. 46], возрастает от $2,0 \cdot 10^6$ до $1,0 \cdot 10^{10}$ Ом·см при увеличении γ от 0 до 0,4, в то время как удельное сопротивление пленок ПКЛК, осажденных при пониженном давлении, возрастает от $3,4 \cdot 10^6$ до $2,1 \cdot 10^7$ Ом·см при увеличении γ от 0 до 0,5 [16] (рис. 3). В то же время величина удельного сопротивления пленок ПКЛК определяется содержанием кислорода в пленке ПКЛК (рис. 4).

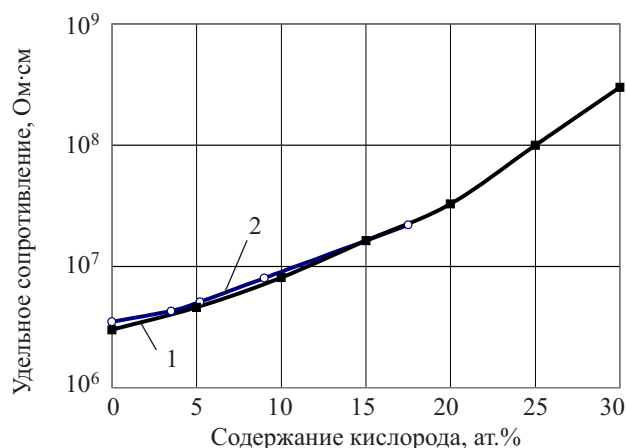


Рис. 4. Зависимость величины удельного сопротивления пленок ПКЛК от содержания кислорода:

1 — $P=24$ Па [4]; 2 — атмосферное давление [16]

Для приборов с напряжением пробоя до 600 В оптимальным является удельное сопротивление примерно 10^7 Ом·см, а для приборов с напряжением пробоя до 1500 В — 10^8 Ом·см [3, 17]. Кроме того, с целью снижения токов утечки и предотвращения снижения коэффициента усиления транзистора, между подложкой и слоем ПКЛК используется тонкий слой оксида кремния [18, 19]. Как показано в [15], оптимальная толщина оксида кремния составляет 2—3 нм.

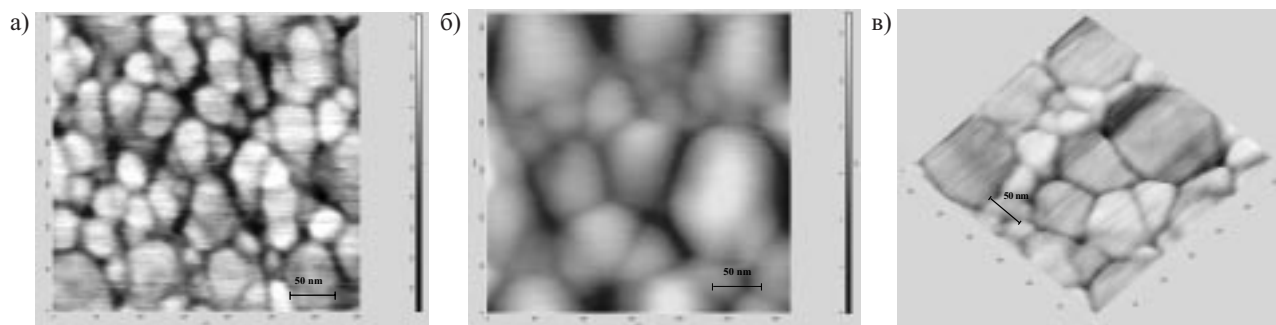


Рис. 5. Изображения островковой «пленки» ПК ($\gamma=0$), полученные при помощи атомно-силового микроскопа (АСМ): *a* — длительность осаждения 15 с (в плане); *б* — длительность осаждения 45 с (в плане); *в* — длительность осаждения 45 с (трехмерное изображение)

С целью формирования защитного слоя пленка ПКЛК может окисляться термически либо покрываться слоем оксида кремния, полученным газопазным осаждением [18]. Кроме того, в качестве защитного слоя может использоваться слой нитрида кремния [3] или второй слой ПКЛК с более высоким содержанием кислорода [18]. С целью улучшения характеристик приборов слой ПКЛК также может частично удаляться [18], в частности в областях между базой и эмиттером.

Состав, структура и свойства пленок ПКЛК существенно зависят от начальной стадии роста пленок.

Как видно из рис. 5, *a*, после осаждения ПК в течение 15 с образуются островковые «пленки» с размером отдельных островков 20—75 нм и высотой до 4,5 нм, а при увеличении длительности осаждения до 30 с происходит независимый рост островков до размеров 20—100 нм без изменения их количества. Затем в островковой «пленке» начинается слияние островков (коалесценция). Этот процесс характеризуется уменьшением общего количества островков и увеличением их размеров до 50—140 нм, при этом высота достигает 12 нм (рис. 5, *б*, *в*).

Толщина пленки ПК, соответствующая окончанию индукционного периода и образованию сплошной пленки, составляет около 22 нм, что хорошо согласуется с результатами работы [20]. Исследования показали, что как островковые, так и сплошные пленки на начальных стадиях роста являются нетекстурированными, не имеют преимущественной ориентации кристаллитов (рис. 6), что указывает на спонтанный характер зародышеобразования.

При осаждении пленок ПКЛК с содержанием 22 ат. % в течение 15 с (рис. 7, *a*), как и на начальной



Рис. 6. Типичная электронограмма пленки нелегированного ПК на начальной стадии роста и коалесценции островков

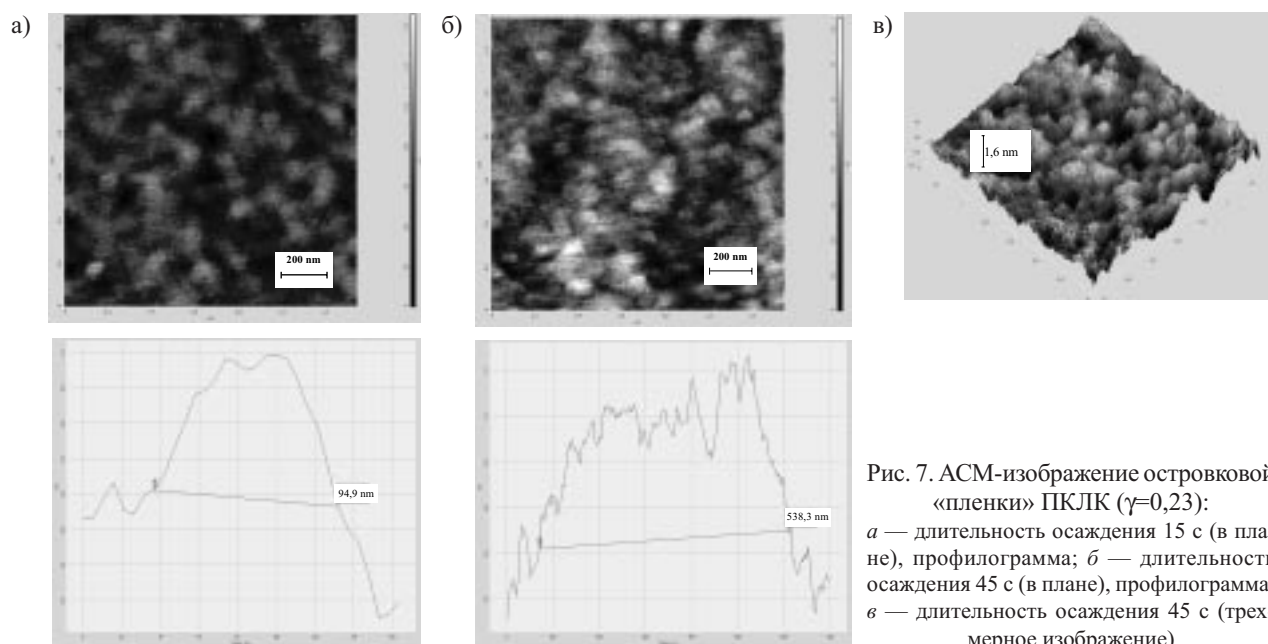


Рис. 7. АСМ-изображение островковой «пленки» ПКЛК ($\gamma=0,23$):

a — длительность осаждения 15 с (в плане), профилограмма; *б* — длительность осаждения 45 с (в плане), профилограмма; *в* — длительность осаждения 45 с (трехмерное изображение)

стадии роста нелегированного ПК, образуются островковые «пленки» с размером отдельных островков до 95 нм и высотой 0,6—0,8 нм (для сравнения: высота выступов на исходной подложке кремния 0,4 нм, а радиус атома кремния 0,117 нм). При этом плотность островков почти на порядок меньше, чем при осаждении ПК (примерно $(3,1 \dots 4,3) \cdot 10^{10}$ и $(4,1 \dots 4,8) \cdot 10^9$ см⁻² для ПК и ПКЛК, соответственно).

На последующих этапах роста ПКЛК происходит увеличение размеров островков до 538 нм, при этом их количество уменьшается (в 1,6—1,7 раза), а высота не превышает 1,6 нм (рис. 7, б, в).

Наличие на профилограмме ПКЛК после осаждения в течение 45 с (рис. 7, б) характерных выступов размером 94,5 нм и высотой 0,6 нм позволяет предположить, что на поверхности островков появляются новые зерна-островки, т. е. при осаждении ПКЛК в смеси «закись азота—моносилан» происходит образование новых центров зародышеобразования на первичных островках. При увеличении длительности осаждения до 120 с размах между впадинами и выступами микрорельефа не превышает 1,2 нм (рис. 8), а толщина пленки составляет около 5 нм. Таким образом, формирование сплошной пленки ПКЛК происходит при меньшей толщине (около 5 нм) по сравнению с ПК. Это обуславливает существенное снижение средней шероховатости пленок ПКЛК ($R_a=0,09$ нм при $t=45$ с) по сравнению с пленками ПК ($R_a=1,52$ нм при $t=45$ с).

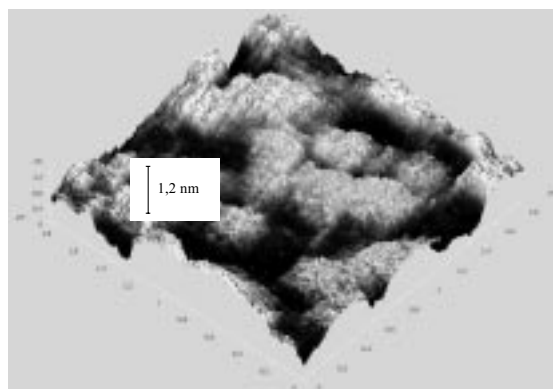


Рис. 8. АСМ-изображение островковой «пленки» ПКЛК (длительность осаждения 120 с, $\gamma=0,23$)

Подобный эффект наблюдали авторы работы [21] при создании тонкой оксидной прослойки на поликристаллическом кремнии при вакуумном отжиге. Поэтому можно предположить, что при осаждении пленок ПКЛК островки поликристаллического кремния покрываются оксидом.

Толщина пленки ПКЛК, соответствующая окончанию индукционного периода и образованию сплошной пленки при $\gamma=0,23$, в отличие от данных работы [16], составляет около 5 нм. ПКЛК не имеет ярко выраженного кристаллического строения, о чем свидетельствует характер дифракционных картин ПКЛК (рис. 9, б).

При увеличении значения γ до 0,5 размер отдельных островков при длительности осаждения 30 с уменьшается до 64,6 нм (рис. 10, б, в) при средней

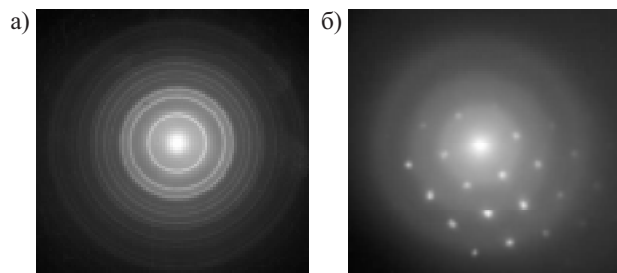
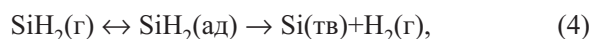
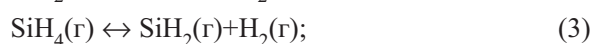
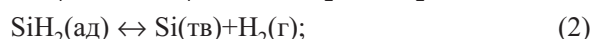


Рис. 9. Типичные электронограммы:
а — пленка ПК (33 Па); б — пленка ПКЛК (24 Па) с содержанием кислорода 22 ат. %

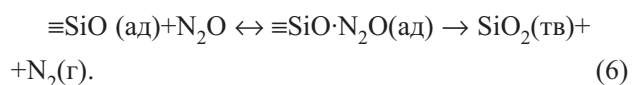
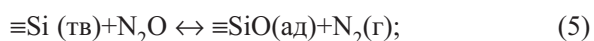
высоте островков 1,0 нм. Сами островки имеют развитую поверхность (4—10 нм) и внутреннюю структуру (рис. 10, б, в). Средняя шероховатость поверхности при увеличении отношения расхода закиси азота и моносилана от 0,23 до 0,5 возрастает от 0,09 до 0,22 нм (при длительности осаждения 45 с и на участке размерами 350×350 нм). Исходя из вышеизложенного использование ПКЛК с $\gamma=0,23$ предпочтительнее.

Полученные результаты объясняются с учетом многомаршрутности процесса осаждения пленок в системе $\text{SiH}_4\text{--N}_2\text{O}$. Пиролиз моносилана протекает по следующим реакциям:



где (г) — газообразный, (ад) — адсорбированный, (тв) — твердый.

Реакции (1), (2) и (3), (4) представляют собой два параллельных пути осаждения ПК. В свою очередь адсорбция и разложение закиси азота происходят на $\equiv\text{Si}^*$ -центрах, образующихся на поверхности растущей пленки [22]:



Так как адсорбция моносилана и закиси азота носит конкурентный характер, скорость роста ПКЛК снижается при увеличении γ за счет уменьшения доли центров, доступных адсорбции моносилана. А на поверхности SiO_2 появляются новые центры зародышеобразования ПК. Что касается уменьшения плотности островков на начальной стадии роста ПКЛК по сравнению с ПК, то данный факт обусловлен конкурирующей адсорбцией закиси азота и моносилана на одних и тех же центрах.

По мере увеличения концентрации закиси азота стимулируется протекание газофазных процессов полимеризации SiH_4 с образованием силилена (реакция (3)). Силilen легко встраивается в кремний-водородные связи, что приводит к образованию более высоких силанов ($\text{Si}_n\text{H}_{2n+2}$), силilenов (Si_nH_{2n}) и кремниевых кластеров [23]:

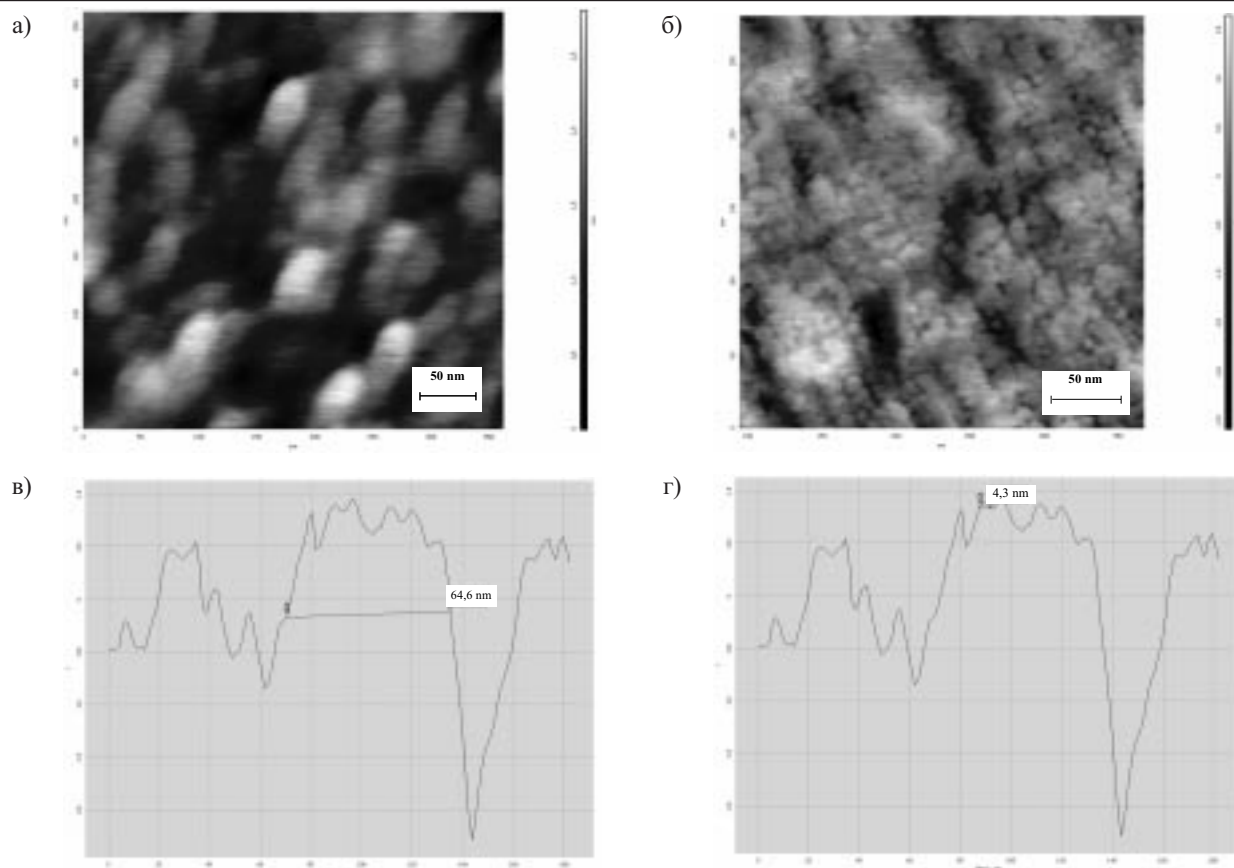
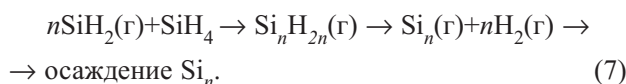
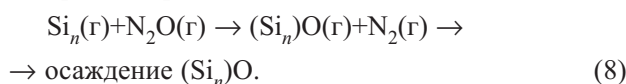


Рис. 10. АСМ-изображения в плане островковой «пленки» ПКЛК ($\gamma=0,5$) при длительности осаждения 15 с (а) и 30 с (б) и профилограмма при длительности осаждения 30 с (в, г)



На поверхности кластеров также могут протекать адсорбция и разложение закиси азота:



Кроме того, силилены также могут реагировать с N_2O с образованием силанолов, которые могут быть окислены в газовой фазе или диффундируют к поверхности с последующим окислением и встраиванием в растущую пленку [8]:



или даже



Таким образом, по мере увеличения γ стимулируется протекание газозависимых процессов полимеризации силана с образованием силилена, а также более высоких силанов и силиленов, которые также окисляются закисью азота и встраиваются в растущую пленку (см. рис. 10, б, в, г).

В диапазоне γ от 0,15 до 0,3 происходит изменение кинетики процесса осаждения, что отражается в изменении величины эффективной энергии активации. Объяснение данного эффекта требует проведения дополнительных исследований.

При $t_{\text{ос}}=650^\circ\text{C}$ в диапазоне γ от 0,05 до 1,0 происходит образование пленок ПКЛК, а при $\gamma>1,0$ — пленок переходного состава SiO_x , близких к SiO_2 . По мере увеличения температуры осаждения до 750°C область γ , в которой происходит образование ПКЛК, сужается, т. е. при $t_{\text{ос}}=650^\circ\text{C}$ процесс осаждения является более управляемым по содержанию кислорода.

Заключение

Исследования показали, что при осаждении поликристаллического кремния, легированного кислородом, как и при осаждении нелегированного поликристаллического кремния, на начальной стадии роста присутствует индукционный период: сначала происходит образование островков размером до 95 нм и высотой 0,6—0,8 нм и их независимый рост, а затем коалесценция (слияние) островков и образование сплошной пленки. Однако плотность островков почти на порядок меньше, чем при осаждении ПК, что, по мнению автора, обусловлено конкурирующей адсорбцией закиси азота и моносилана на одних и тех же центрах. При увеличении отношения потоков закиси азота и моносилана (γ) от 0 до 0,23 толщина пленки, соответствующая окончанию индукционного периода, уменьшается и составляет около 5 нм (для ПК — 22 ± 4 нм). Средняя шероховатость поверхности R_a пленок ПКЛК ($\gamma=0,23$) составляет 0,09 нм, а пленок ПК — 1,52 нм при равной длительности осаждения (45 с).

При содержании кислорода в ПКЛК до 22,0 ат.% пленки не имеют ярко выраженной кристаллической структуры. Плотность пленок во всем исследованном диапазоне составляла 2,2—2,3 г/см³. Величина показателя преломления ПКЛК уменьшается от 3,7 до 1,7 при увеличении γ от 0,05 до 3,0 при температуре осаждения 650°C. Величина удельного сопротивления определяется содержанием кислорода в ПКЛК независимо от давления в процессе осаждения.

Предложено объяснение полученных результатов на основе многомаршрутного процесса осаждения слоев в системе $\text{SiH}_4\text{-N}_2\text{O}$. Адсорбция и разложение заиси азота происходит на поверхности поликремниевых островков, а на поверхности оксида кремния образуются новые центры зародышеобразования ПК. Образование оксидной «капсулы-прослойки» вокруг зерна ПК способствует снижению размеров зерен ПКЛК и подавлению увеличения их размеров в процессе роста и последующих термических обработок.

Полученные результаты использованы для оптимизации процесса изготовления изделий силовой электроники.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Turtsevich A. S., Nalivaiko O. Y., Lesnikova V. P. et al. The effect of pressure and $\text{N}_2\text{O}/\text{SiH}_4$ ratio on the properties of SIPOS films // Intern. Conf. "Micro- and Nanoelectronics 2005".— Moscow, Zvenigorod, Russia.— 2005.— P. 31.
2. Mimura A., Oohayashi M., Furakami S. et al. High-voltage planar structure using $\text{SiO}_2\text{-SIPOS-SiO}_2$ film // IEEE Electron. Device Lett.— 1985.— Vol. EDL-6.— P. 189—191.
3. Блихер А. Физика силовых биполярных и полевых транзисторов.— Л.: Энергоатомиздат, 1986.
4. Pat. 5751043 USA. SRAM with SIPOS resistor / Chue-Sun You.— 1998.
5. Pat. 5478790 USA. Method of fabricating poly-silicon resistor / S. Shishiguchi.— 1995.
6. Кукушкин С. А., Осипов А. В. Формирование и эволюция фазового состава и связанных с ним свойств в процессе роста тонких пленок // Журнал технической физики.— 1997.— Т. 67, № 10.— С. 112—120.
7. Современные проблемы физической химии поверхности полупроводников / Под. ред. А. В. Ржанова, С. М. Репинского.— Новосибирск: Наука, 1988.
8. Chapple-Sokol J. D., Guinda C. J., Gordon R. G. A kinetic study of the atmospheric pressure CVD reaction of silane and nitrous oxide // J. Electrochemical Society.— 1989.— Vol. 136, N 10.— P. 2993—3003.
9. Васильев В. Ю., Курченко А. Н. Об осаждении SiO_2 окислением моносилана закисью азота при пониженном давлении / В кн.: Полупроводниковая тензометрия.— Новосибирск: НЭТИ, 1988.— С. 11—22.
10. Сухов М. С., Щеглова Е. З. О роли адсорбционных стадий процесса при осаждении слоев окислением моносилана закисью азота // Поверхность.— 1985.— № 4.— С. 72—77.
11. Hitchman M. L., Kane J. Semi-insulating polysilicon (SIPOS) deposition in a low pressure CVD reactor. I. Deposition kinetics // J. of Crystal Growth.— 1981.— Vol. 55, N 6.— P. 485—500.
12. Turtsevich A. S., Krasnitsky V. Y., Emelyanov V. A. et al. The effect of production condition for in situ phosphorus doped LPCVD polysilicon in monosilane/phosphine system on the deposition process kinetics // Thin Solid Films.— 1994.— Vol. 248.— P. 28—31.
13. Турцевич А. С., Наливайко О. Ю., Макаревич И. И. и др. Кинетика осаждения слоев в системе $\text{SiH}_4\text{-N}_2\text{O}$ в реакторе пониженного давления // Поверхность.— 1996.— № 8.— С. 10—18.
14. Harbeck G., Klausbauer L., Steingmeir E. P. Growth and physical properties of LPCVD polycrystalline silicon films // J. Electrochemical Society.— 1984.— Vol. 131, N 3.— P. 675—682.
15. Hitchman M. L., Widmer A. E. Semi-insulating polysilicon (SIPOS) deposition in a low pressure CVD reactor. II. Oxygen content // J. of Crystal Growth.— 1981.— Vol. 55, N 6.— P. 501—509.
16. Турцевич А. С., Наливайко О. Ю., Ануфриев Л. П. и др. Структурно-морфологические и электрофизические свойства пленок полуизолирующего кремния // Вакуумная техника и технология.— 2006.— Т. 16, № 1.— С. 31—33.
17. Турцевич А. С., Ануфриев Л. П. Пленки поликристаллического кремния в технологии производства интегральных схем и полупроводниковых приборов.— Мн.: Белорусская наука, 2006.
18. Pat. 6660570 USA. Method of fabrication of a high voltage semiconductor device using SIPOS / J. K. Kim, J. M. Kim, K. W. Kim et al.— 2003.
19. Sundoe J. N., Hugles J. R. Properties of the SIPOS-silicon interface/insulating films on semiconductors // Proceedings of the Intern. Conf. INFOS-85.— Toulouse, France.— 1985.— P. 212—217.
20. Турцевич А. С., Гранько В. И., Наливайко О. Ю. и др. Начальная стадия роста слоев поликристаллического кремния, легированного фосфором в процессе роста // Электронная техника.— Сер. Технология, организация производства и оборудование.— 1993.— № 4—5.— С. 57—59.
21. Турцевич А. С., Ануфриев Л. П., Лесникова В. П. и др. Влияние условий осаждения поликристаллического кремния на его структурно-морфологические свойства // Вакуумная техника и технология.— 2004.— Т. 14, № 4.— С. 227—232.
22. Бакланов М. Р., Кручинин В. Н., Репинский С. М. и др. Критические условия при взаимодействии заиси азота с поверхностью кремния при низких давлениях // Поверхность.— 1986.— № 10.— С. 79—86.
23. Сухов М. С., Кокорин С. М. Мономолекулярные стадии в процессе осаждения слоев диоксида кремния // Изв. АН СССР. Неорганические материалы.— 1987.— Т. 23, № 12.— С. 2021—2025.

НОВЫЕ КНИГИ

Блюмх Б. Основы ЯМР.— М.: Техносфера, 2007.— 160 с.

В книге охвачены все области ядерно-магнитного резонанса: методология, оборудование, химический анализ, двумерная спектроскопия, ЯМР-визуализация, ЯМР подвижных жидкостей, контроль качества при помощи ЯМР.

Это наиболее полный учебник по ЯМР на сегодняшний день.

Книга предназначена для преподавателей, аспирантов и студентов, изучающих физику, химию, химическое машиностроение и материаловедение, а также для ученых и инженеров, желающих пополнить свои знания о ЯМР.



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

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

Дата поступления в редакцию
30.10.2007 г.

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

МЕТОДЫ УДАЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ЖИДКОСТНОМ ТРАВЛЕНИИ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Рассмотрены модель возникновения дефектов на поверхности поликристаллического кремния при обработке полупроводниковых пластин в травителе, а также модель удаления этих дефектов в растворах химикатов.

Одной из проблем, возникающих на маршруте изготовления КМОП-микросхем, является наличие пятен поликристаллического кремния (ПКК), не вытравленного при формировании поликремниевого затвора. Анализ причин брака показывает, что на отдельных партиях пластин перед плазмохимическим травлением ПКК обнаруживаются дефекты в виде пятен, которые становятся маской при травлении. Увеличение времени перетравки при плазмохимическом травлении (ПХТ) не устраняет эти дефекты.

Внешний вид пятен невытравленного поликремния представлен на **рис. 1**. В зарубежной литературе подобные дефекты называют «water marks», «poly spots», «poly rings», «water spots». Считается, что основными причинами их появления могут быть качество осажденной пленки поликремния, качество операции удаления пленки фосфоросиликатного стекла (ФСС) после диффузии фосфора [1], качество деионизованной воды, используемой для отмывки поверхности поликремния после обработки в растворах фтороводородной кислоты [2]. Некоторые исследователи полагают, что на появление дефектов могут влиять также режимы сушки пластин после химической обработки [3].

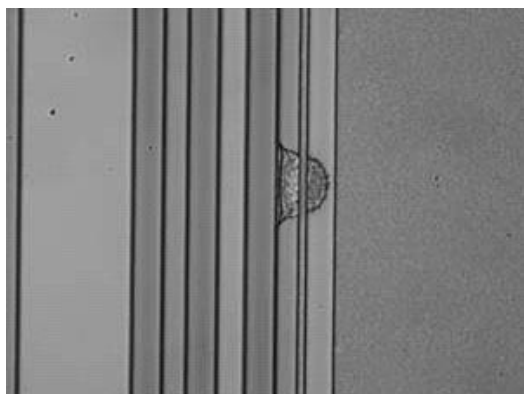


Рис. 1. Внешний вид невытравленного поликремния после ПХТ ПКК и удаления фоторезиста

Изученный в этой работе процесс формирования поликремниевого затвора включает в себя следующую последовательность технологических операций: осаждение слоя ПКК — термическая диффузия примеси фосфора с образованием на поверхности ПКК пленки ФСС — травление ФСС в травителе на основе фтороводородной кислоты — химическая очистка пластин в перекисно-аммиачном растворе (ПАР) — фотолитография слоя «Затвор» — плазмохимическое травление ПКК. После травления ФСС пластины промываются в деионизованной воде и сушатся методом центрифугирования в атмосфере азота.

Анализ пластин на каждой стадии процесса показал, что пятна появляются на этапе выполнения жидкостных химических обработок. При этом пятна обнаруживаются только в светлом поле микроскопа и не видны в темном поле микроскопа при увеличении от 200 до 1000 $\times$.

Целью настоящей статьи является разработка и изучение методов удаления дефектов, возникающих при жидкостном травлении поверхности ПКК при формировании поликремниевого затвора. Предварительно авторами была разработана методика подготовки контрольных пластин и изучено влияние различных комбинаций и режимов химических операций на появление дефектов.

Методика подготовки контрольных пластин и эксперимент

Контрольные пластины готовились в соответствии с типовым маршрутом изготовления КМОП-микросхем. Были изготовлены пять групп кремниевых пластин КДБ-12 диаметром 150 мм, отличающихся толщиной сформированного на их поверхности термического оксида кремния: 0,1; 0,3; 0,48; 0,8 и 1,0 мкм. На этих пластинах при помощи жидкостного химического травления через маску фоторезиста была создана тестовая структура, представляющая собой площадку монокремния размерами 1,0 $\times$ 1,0 мм, окруженную несколькими шинами термического оксида кремния шириной от 10 до 150 мкм (**рис. 2**). Высота шин в каждой группе контрольных пластин была равна толщине выращенного оксида кремния на исходной пластине. Примыкающие друг к другу ряды тестовых структур занимали всю поверхность контрольной пластины.

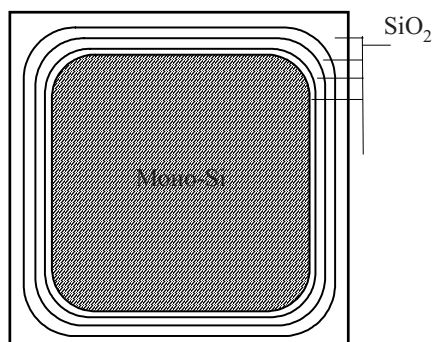


Рис. 2. Схема исходного рисунка тестовой структуры на контрольных пластинах

На всех контрольных пластинах были выполнены следующие операции:

1. Химическая очистка в растворе ПАР.
2. Окисление (толщина 42,5 нм).
3. Осаждение ПКК толщиной 0,6 мкм пиролизом моносилана.
4. Химическая очистка в ПАР.
5. Термическая диффузия фосфора (диффузانت POCl_3).

После выполнения каждой операции пластины контролировались с помощью оптического микроскопа на наличие дефектов в виде пятен. На всех пластинах пятна отсутствовали.

Выяснение влияния операции удаления ФСС на наличие пятен. После диффузии фосфора на двух пластинах из каждой группы выполнялось удаление ФСС в травителе состава $\text{HF:H}_2\text{O}=1:10$ в течение 1 мин. После травления и промывки в деионизованной воде пластины сушили в блоке сушки комплекса химоб-

работки (КХО) при скорости вращения центрифуги 700 об./мин в течение 8 мин. При сушке одна пластина ориентировалась в кассете базовым срезом вверх, а другая — базовым срезом вниз. При контроле пластин в светлом поле микроскопа на всех пластинах были обнаружены дефекты в виде пятен.

Выяснение влияния режимов промывки и сушки, типа оборудования на образование дефектов. Пластины с толщиной окисла 0,1—1,0 мкм были разделены на группы и подготовлены в соответствии с планом эксперимента (рис. 3):

1) На пластинах 1-й группы выполнялось удаление ФСС, промывка и сушка в центрифуге при различной скорости вращения на одной установке КХО. Затем на части пластин выполнялась объемная химобработка на установке КХО в перекисно-аммиачном растворе с концентрацией перекиси водорода 5% при различной температуре. На другой части пластин выполнялась струйная химобработка в перекисно-аммиачном растворе с концентрацией перекиси водорода 4% на установке «Mercury MP» при температуре 70°C.

2) На пластинах 2-й группы удаление ФСС и промывка выполнялись на одной установке КХО, сушка пластин выполнялась на разных установках КХО при одинаковой скорости вращения — 700 об./мин.

3) На пластинах 3-й группы удаление ФСС и промывка выполнялись на одной установке КХО, химочистка в ПАР и сушка — на двух других установках КХО.

4) На пластинах 4-й группы удаление ФСС, промывка и сушка проводились в установке струйной химобработки «Mercury MP» (травитель $\text{HF:H}_2\text{O}=1:30$,

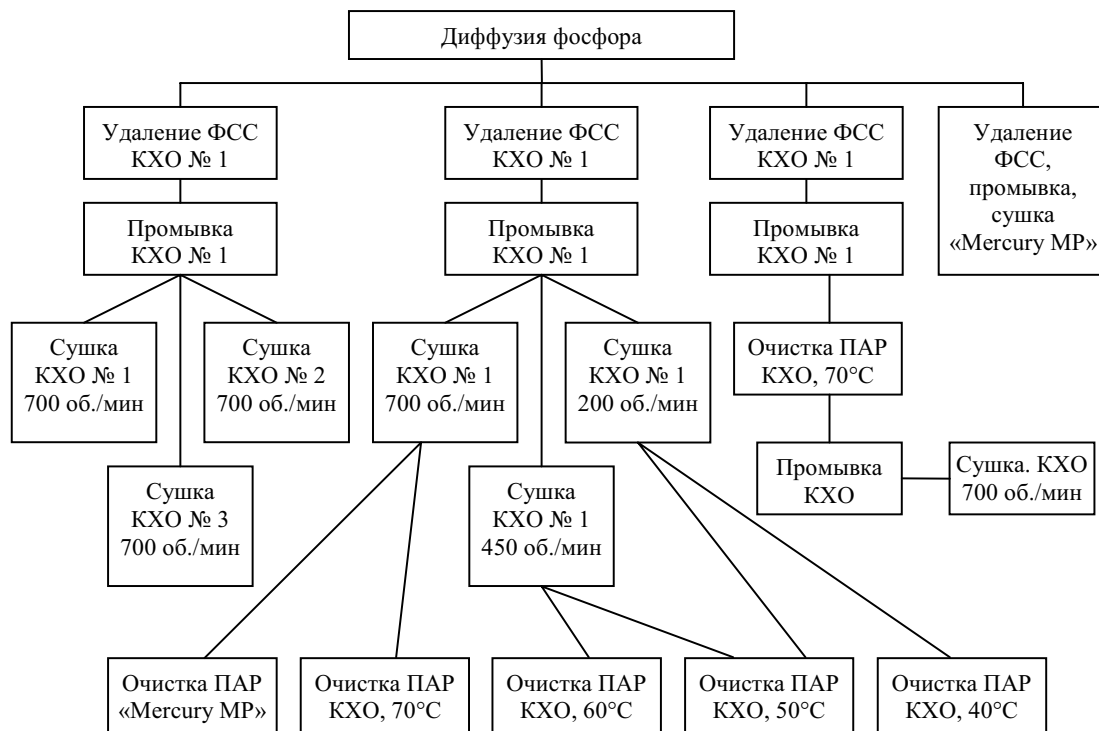


Рис. 3. Схема эксперимента по выяснению влияния режимов обработки пластин на появление дефектов на поверхности ПКК

время травления 4 мин, скорость вращения центрифуги — 450 об./мин).

Оценка влияния концентрации компонентов ПАР на эффективность удаления дефектов. Были приготовлены растворы с различным содержанием перекиси водорода и аммиака. Время обработки на установке КХО составляло 10 мин, температура обработки — $75 \pm 5^\circ\text{C}$.

Оценка влияния температуры на эффективность удаления дефектов. Была исследована скорость травления термического окисла в ПАР при различной температуре и проведена обработка контрольных пластин с пятнами в растворе ПАР с постоянной концентрацией компонентов в течение 10 мин при различной температуре (50, 60, 70, 75 и 80°C).

Для визуального контроля состояния поверхности пластин после обработки использовался оптический микроскоп «Leitz LTS». Контроль проводился в светлом и в темном поле микроскопа при различных увеличениях.

Для исследования элементного состава дефектов на поверхности ПКК использовался оже-спектрометр PHI-660 фирмы Perkin Elmer.

Концентрация перекиси водорода и аммиака в ПАР определялась путем титрометрического анализа.

Измерение толщины пленок диоксида кремния проводилось на интерференционном измерителе «Leitz LTS-M/SP». Скорость травления диоксида кремния в перекисно-аммиачном растворе рассчитывалась по формуле

$$V_{\text{тр}} = (d_1 - d_2) / t_{\text{тр}},$$

где $V_{\text{тр}}$ — скорость травления;

d_1, d_2 — толщина пленки диоксида кремния до и после обработки, соответственно;

$t_{\text{тр}}$ — время травления.

Результаты и обсуждение

При визуальном контроле поверхности контрольных пластин с тестовым рисунком после выполнения каждой из операций 2, 3, 5 — окисления, осаждения ПКК и диффузии фосфора — не было выявлено дефектов в виде пятен. После удаления ФСС на контрольных пластинах с исходной толщиной термического оксида кремния 0,3, 0,48, 0,8 и 1,0 мкм в светлом поле микроскопа были обнаружены дефекты в виде пятен.

Отсутствие пятен на поверхности поликремния после химобработки ПКК перед выполнением операции диффузии фосфора указывает на влияние свойств поверхности на вероятность возникновения дефектов. Поверхность ПКК перед диффузией фосфора покрыта тонкой пленкой гидрофильного оксида кремния. После травления ФСС поверхность поликремния становится гидрофобной. Это означает, что вода может удерживаться на поверхности поликремния в виде отдельных капель. Площадка тестовой структуры является наиболее благоприятным местом для удержания капель воды, т. к. она со всех сторон ограничена шинами SiO_2 высотой до 1,0 мкм. При определенных условиях эти капли воды после

высыхания становятся причиной появления дефектов на поверхности слоя поликремния.

Один из возможных механизмов образования дефектов представлен в работе [4]. Кислород из окружающей атмосферы растворяется в капле воды, удерживающейся на гидрофобной поверхности поликремния. Растворенный кислород диффундирует к границе раздела между поверхностью поликремния и каплей воды. На поверхности поликремния образуется оксид кремния. Образующийся оксид переходит в раствор в виде кремниевой кислоты H_2SiO_3 . Кремниевая кислота диффундирует в жидкость и диссоциирует (рис. 4, а). После высыхания капли воды кремниевая кислота разлагается на оксид кремния и остается на поверхности поликремния в виде дефекта-пятна (рис. 4, б).

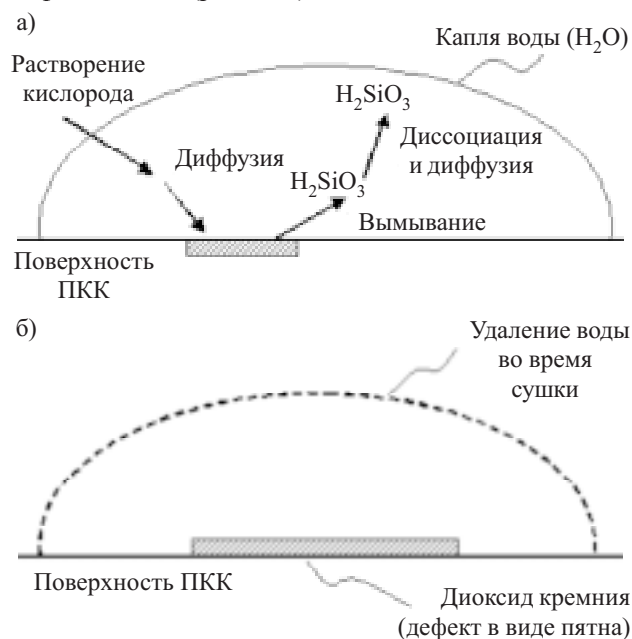


Рис. 4. Механизм образования дефекта в виде пятна на поверхности поликристаллического кремния

Место расположения дефектов зависит от ориентации пластины в кассете. При ориентации пластины базовым срезом вверх дефекты располагались вблизи базового среза, а при ориентации базовым срезом вниз — на диаметрально противоположной стороне пластины.

С уменьшением скорости вращения центрифуги блока сушки установки КХО увеличивается ширина зоны локализации дефектов и плотность дефектов в

Таблица 1

Результаты визуального контроля пластин после удаления ФСС на установке КХО

Скорость вращения центрифуги во время сушки, об./мин	Доля дефектных тестовых структур на пластине, %	Примерная ширина зоны дефектов на пластине, мм
200	98	150
450	70	100
700	5	15

этой зоне вне зависимости от ориентации пластины в кассете (табл. 1). На пластинах, высушенных при 200 об./мин, дефекты обнаруживались практически на всех тестовых структурах по всей поверхности пластины.

Внешний вид дефектов представлен на рис. 5. Из рисунка видно, что дефекты поверхности поликремния прилегают к стенке шины исходного термического окисла, ограничивающей тестовые структуры.

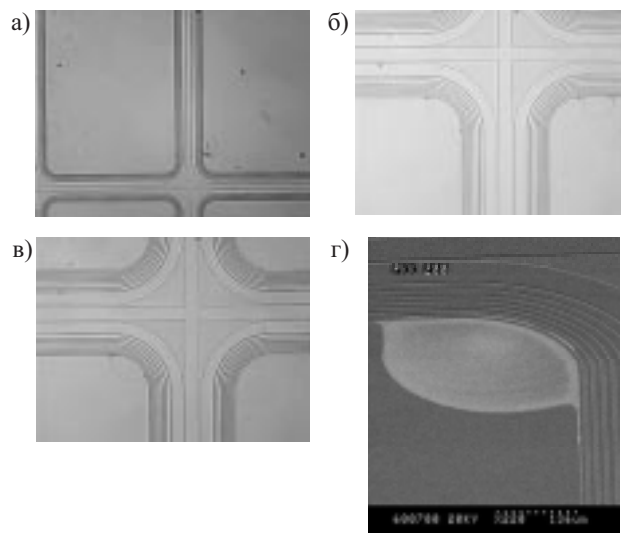


Рис. 5. Внешний вид пластин после удаления ФСС и сушки на установке КХО с различной скоростью вращения центрифуги:

а — 200 об./мин; б — 450 об./мин; в — 700 об./мин; г — фотография РЭМ

Изложенные результаты показывают, что режим сушки пластин в центрифуге влияет на количество и плотность размещения дефектов. В то же время зависимость положения области локализации дефектов от ориентации пластины указывает на влияние физических процессов, происходящих при вращении пластины в центрифуге. При любой ориентации пластины дефекты поликремния локализуются в той ее области, которая расположена ближе к оси вращения центрифуги.

На рис. 6 показана схема расположения пластин в центрифуге во время вращения. При вращении пластин в центрифуге на каплю воды, находящуюся в области локализации дефектов в точке А, действует центробежная сила

$$F_A = 4m\pi^2 n^2 R_1,$$

где m — масса капли;

n — частота вращения центрифуги;

R_1 — расстояние от точки А до оси вращения центрифуги (для центрифуги установки КХО $R_1 = 9,8$ см).

Центробежная сила, которая действует на каплю, находящуюся вне области локализации дефектов, в точке В, равна

$$F_B = 4m\pi^2 n^2 R_2,$$

где R_2 — расстояние от точки В до оси вращения центрифуги (в нашем случае для пластины диаметром 150 мм $R_2 = 9,8 + 14,5 = 24,3$ см).

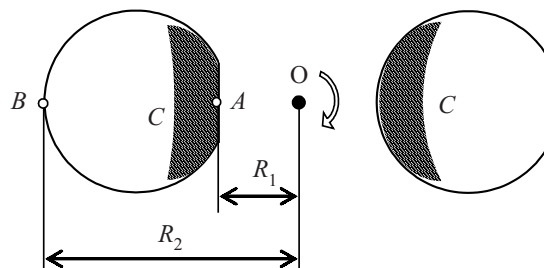


Рис. 6. Схема расположения пластин в центрифуге во время сушки при проведении эксперимента (С — область локализации дефектов ПКК на пластине)

Таким образом, на поведение капли воды влияет ее расположение относительно оси вращения и частота (скорость) вращения центрифуги. Чем выше скорость вращения центрифуги и больше расстояние от оси вращения, тем выше центробежная сила, действующая на каплю воды на поверхности пластины. Под действием центробежной силы капля воды сбрасывается с поверхности поликремния, после чего она не сможет служить источником дефекта.

Допуская, что масса капель, находящихся в точках А и В, одинакова, получим:

$$\frac{F_A}{F_B} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{9,8}{24,3} = \frac{1}{2,48}.$$

Отсюда следует, что при вращении центрифуги на каплю воды в точке В действует центробежная сила в 2,48 раза большая, чем в точке А. Величина этой силы достаточна для того, чтобы сбросить с поверхности ПКК каплю в точке В, а также в других точках, находящихся вне области локализации дефектов С. Чтобы достичь полного удаления капель воды со всей поверхности пластины, нужно чтобы в точке А на каплю действовала такая же по величине центробежная сила. Для этого частота вращения центрифуги при сушке пластин должна быть увеличена в 1,57 раза (сила, действующая на каплю, прямо пропорциональна квадрату частоты вращения). Таким образом, скорость вращения должна быть увеличена с 700 до 1100 об./мин. Однако при скорости вращения центрифуги на установке КХО выше 800 об./мин наблюдается деформация операционных кассет и повышается вероятность раскола пластин от механических перегрузок.

Вместе с тем сушка пластин, на поверхности которых имеются сформированные структуры разной высоты, может потребовать еще большей скорости вращения центрифуги. (Влияние топологии пластины косвенно подтверждается отсутствием дефектов поликремния на контрольных пластинах с исходной толщиной окисла кремния 0,1 мкм и, следовательно, с соответствующей высотой шин тестовой структуры. Шина такой высоты при скорости вращения карусели 700 об./мин не может быть препятствием для сбрасываемых центробежной силой капель, в отличие от более высоких «стенки» — 0,3, 0,48, 0,8 и 1,0 мкм — на других группах контрольных пластин.)

При проведении сушки контрольных пластин после удаления ФСС на других установках КХО при

скорости вращения центрифуги 700 об./мин, а также при снятии ФСС и сушке на установке «Mercury MR», были получены аналогичные результаты по расположению и плотности дефектов поверхности поликремния. Это указывает на то, что причиной появления дефектов не могут служить индивидуальные особенности конкретной единицы оборудования.

Влияние фактора гидрофобности поверхности поликремния после удаления ФСС на появление дефектов подтверждается тем, что на контрольных пластинах, обработанных по схеме «удаление ФСС — промывка — химочистка в ПАР — промывка — сушка» не обнаруживались дефекты ПКК. Отсутствие дефектов в этом случае можно объяснить тем, что при обработке в ПАР поверхность поликремния становится гидрофильной из-за образования на ней пленки оксида кремния. Гидрофильность поверхности препятствует образованию отдельных капель воды при сушке и тем самым способствует равномерному бездефектному высыханию пластины.

Методом оже-спектроскопии (рис. 7) установлено, что дефект представляет собой область окисленного кремния. При проведении оже-спектроскопии

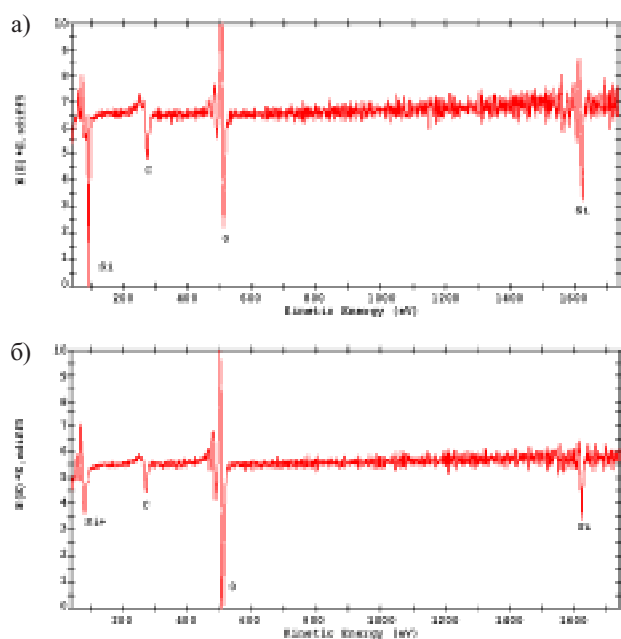


Рис. 7. Оже-спектр поверхности поликремния после удаления ФСС:

а — в области дефекта; б — вне области дефекта

пленка этого оксида кремния легко удаляется пучком атомов аргона, при этом ее толщина внутри дефекта составляет 4—5 нм. По кромке дефекта толщина оксида кремния несколько выше. Однако даже такая незначительная толщина пленки оксида кремния оказывается достаточной для маскирования поверхности поликремния при плазмохимическом травлении ПКК. В результате поликремний не вытравливается, и образуются дефекты (см. рис. 1).

Разработан процесс, позволяющий удалить дефекты. Процесс предполагает соответствующую последовательность операций, выполняемых на установке струйной обработки «Mercury MR»: обработка в смеси Каро — промывка — травление SiO_2 — промывка — ПАР (4% H_2O_2) — промывка — сушка. Обработка в смеси Каро перед травлением обеспечивает минимальную конечную дефектность пластин по частицам; травление гарантирует стравливание окисленных дефектов ПКК; обработка в растворе ПАР восстанавливает гидрофильность поверхности пластин перед окончательной сушкой и обеспечивает качество поверхности поликремния.

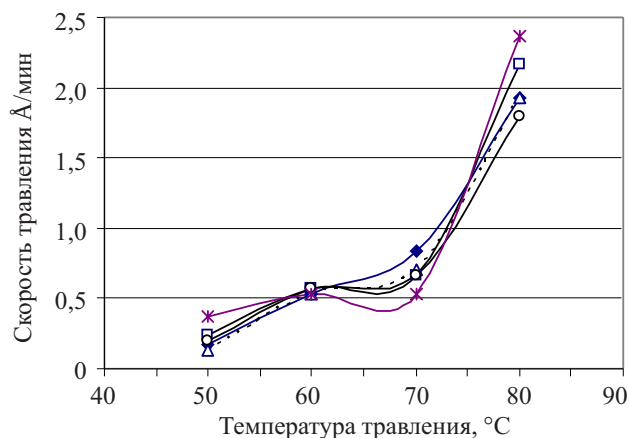


Рис. 8. Скорость травления термического диоксида кремния в растворе ПАР при различной температуре: —◆— пироженное окисление, $T=950^\circ\text{C}$; —□— пироженное окисление, $T=900^\circ\text{C}$; —▲— пироженное окисление, $T=850^\circ\text{C}$; —○— сухое окисление, $T=900^\circ\text{C}$; —✱— отжиг в азоте + сухое окисление, $T=1000^\circ\text{C}$

Исследование скорости травления термического диоксида кремния в перекисно-аммиачном растворе показало ее зависимость от температуры и от метода окисления кремния (табл. 2 и рис. 8). Следует отметить, что представленные данные получены для

Таблица 2

Зависимость изменения толщины слоя термического диоксида кремния (Å) от метода его получения и от температуры обработки в растворе ПАР (время обработки — 30 мин)

Температура обработки, $^\circ\text{C}$	Метод получения слоя диоксида кремния				
	Пироженное окисление, $T=950^\circ\text{C}$	Пироженное окисление, $T=900^\circ\text{C}$	Пироженное окисление, $T=850^\circ\text{C}$	Сухое окисление, $T=900^\circ\text{C}$	Отжиг в азоте + сухое окисление, $T=1000^\circ\text{C}$
50	5	7	4	6	11
60	16	17	16	17	16
70	25	20	21	20	16
80	58	65	58	54	71

слоев диоксида кремния, сформированных при высокотемпературных процессах окисления.

В силу того что пленка оксида кремния в области дефектов поликремния образуется при гораздо более мягких условиях, она должна иметь более высокую скорость травления в перекисно-аммиачных растворах.

При контроле пластин, обработанных в ПАР (H_2O_2 — 5%, NH_3 — 2%) при различной температуре, было установлено, что дефекты полностью удаляются с поверхности ПКК после обработки при 50, 60, 70, 75 и 80°C. Обработка при температуре 40°C и ниже не позволяет удалить дефекты. Очевидно, что при температурах ниже 40°C скорость травления оксида кремния в растворе ПАР недостаточна для стравливания дефектов.

Исследование влияния компонентного состава ПАР показало, что при концентрации H_2O_2 ниже 2% и NH_3 ниже 0,4% дефекты не удаляются (табл. 3).

Таблица 3

Эффективность удаления дефектов с поверхности ПКК в зависимости от содержания компонентов в ПАР

Содержание компонента, г/л		Наличие дефектов после обработки
NH_3	H_2O_2	
21,2	49,5	Дефектов нет
7,3	32,3	“
5,5	29,8	“
5,1	27,2	“
4,3	23,8	“
3,5	19,5	Дефекты есть

Таким образом, состав перекисно-аммиачного раствора и температура обработки влияют на эффективность взаимодействия с окисленной поверхностью поликремния в области дефекта.

В то же время при обработке дефектных пластин в перекисно-аммиачном растворе на установке «Mercury MP» при температуре 70—80°C полного удаления дефектов не происходит. Это связано со способом обработки и концентрацией используемого раствора ПАР. В установке «Mercury MP» нагретый раствор в виде аэрозоля с относительно низким расходом (1850 мл/мин) подается на поверхность холодных пластин, и для прогрева пластин до рабочей температуры 70—80°C требуется определенное время. На протяжении этого времени скорость травления оксида кремния остается низкой.

На установке КХО пластины погружаются в большой объем горячего раствора (22 л), быстро прогреваются, и в результате средняя скорость травления окисленной поверхности поликремния оказывается достаточной для удаления дефектов. Предваритель-

ный подогрев пластин горячей водой при обработке на установке «Mercury MP» не рекомендуется, т. к. в этом случае, по литературным данным, существует опасность подтравки поверхности поликремния [5].

Выводы

1. Причиной появления дефектов рисунка в виде пятен неполностью вытравленного поликремния при формировании затвора КМОП-микросхемы являются гидрофобные свойства поверхности поликремния после обработки в травителе на основе фтороводородной кислоты при выполнении операции «Удаление ФСС».

2. При сушке пластин во время операции «Удаление ФСС» методом центрифугирования капли воды могут задерживаться на гидрофобной поверхности поликремния. В результате на месте высохших капель воды образуются дефекты в виде пятен, состоящих из оксида кремния толщиной до 5 нм и выступающих маской при плазмохимическом травлении поликремния при формировании затвора.

3. При гидрофилизации поверхности поликремния после стравливания ФСС дефекты в виде пятен не образуются.

4. На количество дефектов, возникающих на поверхности поликремния после удаления ФСС, влияет скорость вращения центрифуги и рельеф поверхности пластины. Чем выше скорость вращения, тем ниже вероятность образования этих дефектов. При наличии перепада рельефа менее 0,1 мкм дефекты не образуются.

5. Дефекты на поликремнии, образовавшиеся после травления ФСС, можно удалить методом объемной химической обработки в перекисно-аммиачном растворе при температуре 70—80°C или методом аэрозольной химической обработки по схеме «обработка в смеси Каро — травление SiO_2 — обработка в ПАР на установке «Mercury MP». При обработке дефектных пластин на установке «Mercury MP» только в перекисно-аммиачном растворе дефекты не удаляются.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Grosjean D., Elwell R., Keller J. Using advanced macrodefect inspection technology in MEMS processes // www.micromagazine.com/archive/04/05/grosjean.html
2. Lowell L. New deglaze process for doped polysilicon // Solid State Technology.— 1991.— Vol. 34, N 4.— P. 149—153.
3. Peters L. Water spots: the scourge of wafer dryers // Semiconductor International.— 1998.— Vol. 21, N 9.— P. 83—90.
4. Pat. 6696326 USA. Cleaning method to prevent watermarks / H. Zhang, M. Sakakura, Y. Goto.— 2004.
5. Christenson K. K. Benefits and challenges of centrifugal spray processor technology // Solid State Technology.— 1997.— Vol. 40, N 12.— P. 55—68.

Д. т. н. В. М. СОРОКИН, к. ф.-м. н. Р. Я. ЗЕЛИНСКИЙ,
А. В. РЫБАЛОЧКА, А. С. ОЛИЙНИК

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва
E-mail: zelinski@isp.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
20.08 2007 г.

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

ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС СМ-100 ДЛЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ДИСПЛЕЕВ

Для научных центров и предприятий России, Белоруссии и Украины оптимален комплекс СМ-100, разработанный в Институте физики полупроводников НАН Украины.

Измерение основных электрооптических параметров и характеристик жидкокристаллических (ЖК) дисплеев различных типов — одна из важнейших задач ЖК-приборостроения. Современная научно-исследовательская и производственная база по разработке и изготовлению средств отображения информации на жидких кристаллах нуждается в универсальных средствах технического диагностирования и контроля основных эксплуатационных параметров и характеристик устройств отображения, а именно электрооптических, временных и температурных параметров, мультиплексных свойств, параметров бистабильности и памяти, индикатрис контраста (углового распределения контраста), спектральных характеристик и т. д.

Отсутствие таких средств в значительной степени тормозит процесс разработки и исследования новых перспективных устройств индикаторной техники, включающих в себя как сами дисплеи, так и электронное их обрамление. То же можно сказать и относительно новых ЖК-материалов.

Современные системы диагностирования ЖК-дисплеев

Использование измерительно-вычислительных комплексов в значительной степени снижает трудоемкость исследований и испытаний экспериментальных и опытных образцов ЖК-дисплеев и обеспечивает максимальное количество сведений по корректировке технологического маршрута их изготовления, оптимизации электрических сигналов управления, а также позволяет выявить предельно возможные эксплуатационные параметры приборов в целом. Особое значение приобретает диагностирование экранов на электрооптических эффектах в сверхзакрученных структурах, твист-структурах с активной матричной адресацией, в холестерико-нематических смесях, в диспергированных (капсулированных) нематиках, в ферроэлектрических и антиферроэлектрических жидких кристаллах и др. Результаты диагностирования позволяют сформулировать задачи и

рекомендации конструкторам, технологам, химикам, инженерам по электронному обрамлению и другим специалистам, занимающимся разработкой проблемно-ориентированных средств отображения информации.

Практически во всех передовых научных центрах мира для исследования как электрофизических параметров ЖК-материалов, так и электрооптических параметров ЖК-устройств отображения информации, широко используются измерительно-вычислительные системы фирмы Autronic (Германия) [1]. Однако из-за высокой стоимости эти системы оказались недоступны для научных центров и предприятий России, Белоруссии, Украины. Тем не менее потребность в таких измерительных системах в этих странах очень высока — из-за интенсивного использования широкого класса новых ЖК-дисплеев в создаваемых средствах измерительной, вычислительной техники, другой электронной продукции.

Промышленное производство ряда измерительных систем для диагностирования ЖК-дисплеев немецкая фирма Autronic-Melcher GmbH начала в 1990-х годах. Разработчики шли двумя путями — разработка автоматизированных систем для характеристики дисплеев (приборы серии DMS-301, -501, -703, **рис. 1**) и автоматизированных систем для исследования параметров ЖК-материалов серии DIMOS (LCCS-107, VHRM-105, TBA-105, TBA-110). Дальнейшее развитие указанные приборы нашли в новой серии CONOSCOPE (**рис. 2**), разработанной для быстрой визуализации и оценки цветовых параметров дисплеев с широким углом обзора.

Все перечисленные приборы хорошо зарекомендовали себя при использовании их в научных центрах и лабораториях. Они отличаются широкими функциональными возможностями, высокой точностью измерений, удобством в работе, хорошим дизайном.

Появившиеся в последние годы автоматизированные комплексы фирмы CDR (Гонконг) типа EO-100 для измерения электрооптических характеристик ЖК-дисплеев и типа CG-100 для измерения параметров твист-ячеек (толщины незаполненных ячеек, угла закрутки и др.) отличаются простотой и дешевле приборов фирмы Autronic, но уступают им по функциональным возможностям.

С учетом известных диагностических комплексов сформулированы требования к разработанным

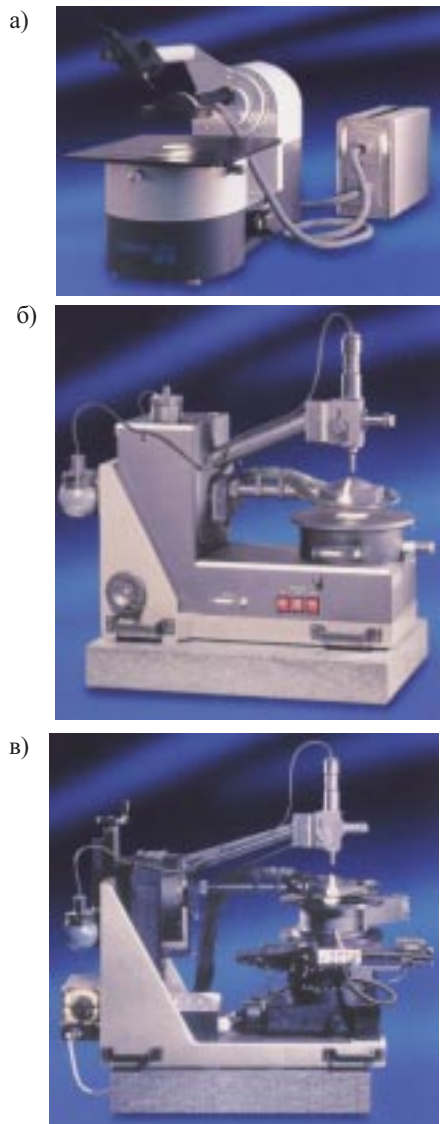


Рис. 1. Измерительно-вычислительные комплексы DMS:
а — DMS-301; б — DMS-501; в — DMS-703



Рис. 2. Измерительно-вычислительный комплекс CONOSCOPE

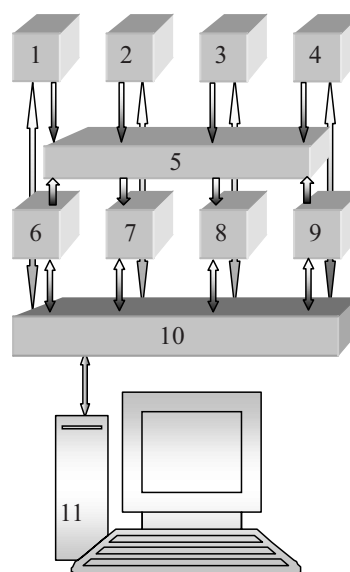


Рис. 3. Структурная схема измерительно-вычислительного комплекса CM-100:

1 — термостат; 2 — блок осветителей; 3 — блок угловой развертки; 4 — блок круговой развертки; 5 — объект исследования; 6 — измерительный генератор; 7 — фотоэлектронный блок; 8 — спектрометр; 9 — блок визуального контроля и юстировки; 10 — системный интерфейс; 11 — персональный компьютер

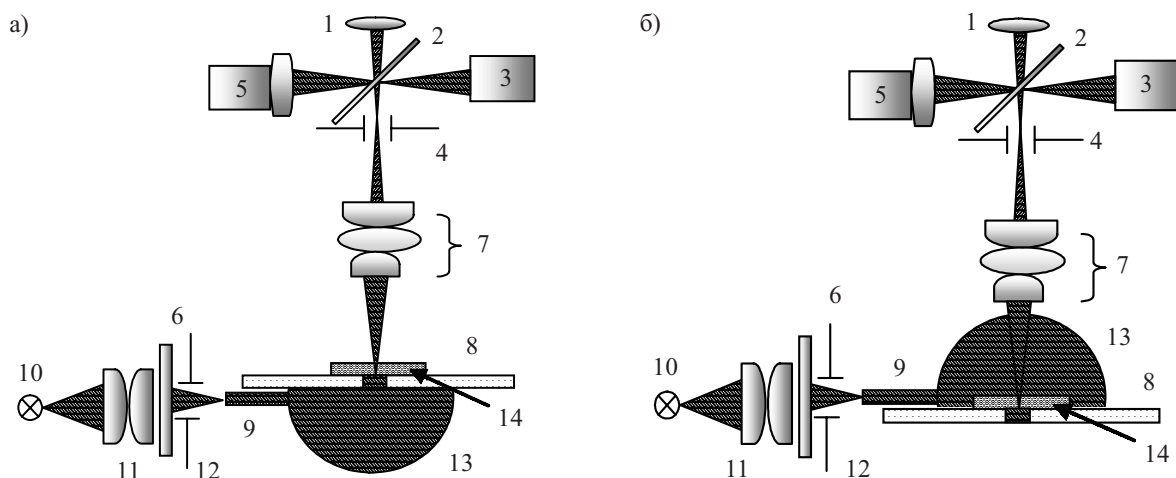


Рис. 4. Оптическая схема измерительно-вычислительного комплекса CM-100 в режиме работы на просвет (а) и на отражение (б) при подсветке образца диффузно рассеянным светом:

1 — окуляр; 2 — поворотное зеркало; 3 — фотоэлектронный преобразователь (ФЭП); 4, 12 — диафрагма; 5 — спектрометр; 6 — ИК-фильтр; 7 — объектив; 8 — предметный столик; 9 — световод; 10 — лампа накаливания; 11 — коллектор; 13 — полусфера Ульбрихта; 14 — образец

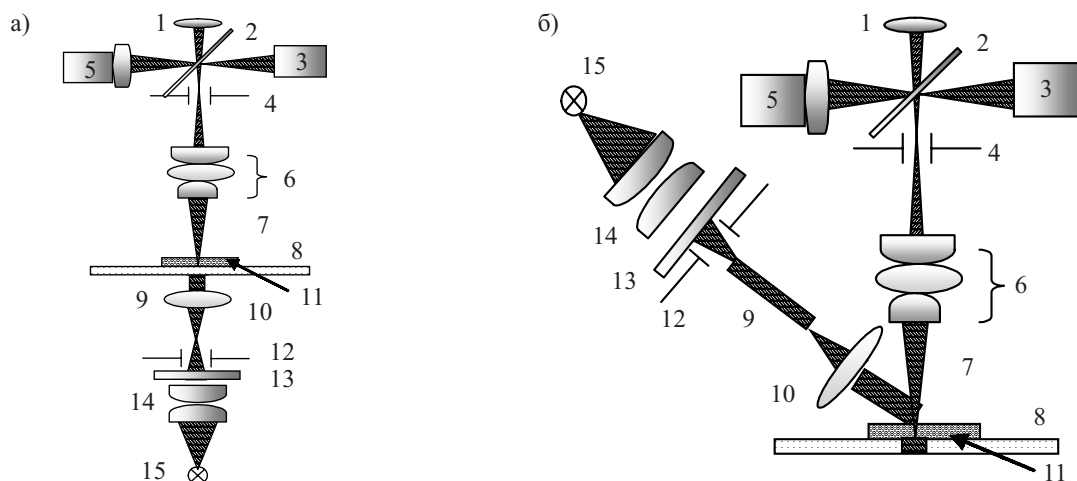


Рис. 5. Оптическая схема измерительно-вычислительного комплекса СМ-100 в режиме работы на просвет (а) и на отражение (б) при подсветке образца коллимированным светом:

1 — окуляр; 2 — поворотное зеркало; 3 — ФЭП; 4, 12 — диафрагма; 5 — спектрометр; 6 — объектив; 7 — полусфера Ульбрихта; 8 — предметный столик; 9 — световод; 10 — коллиimator; 11 — образец; 13 — ИК-фильтр; 14 — коллектор; 15 — лампа накаливания

в Институте физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева измерительно-вычислительным комплексам СМ-100 [2—4] с целью повышения их универсальности и расширения функциональных возможностей, а также применения их для исследования любых плоских средств отображения информации (включая электролюминесцентные, плазменные, светодиодные, электрохромные и другие дисплеи). При этом в задачу разработки входили исследования новых эффективных методов измерения характеристик ЖК-устройств отображения информации и построение на основе этих методов универсальных алгоритмов диагностирования.

Структурная схема комплекса СМ-100 показана на рис. 3. На рис. 4 и 5 представлена его оптическая схема при разных режимах работы. Внешний вид комплекса СМ-100 представлен на рис. 6.

Основное назначение комплексов СМ-100 — диагностирование, контроль и исследование в полном объеме электрооптических параметров плоских средств отображения информации. При этом объектами исследования могут быть:

- индикаторы со статическим управлением на нематических жидких кристаллах;
- мультиплексные ЖК-экраны на твист-эффекте;
- ЖК-экраны на основе эффектов двойного лучепреломления в сверхзакрученных твист-структурах (супертвист);
- ЖК-экраны с активной матричной адресацией;
- отражающие холестерические дисплеи;
- дисплеи на полимерно-диспергированных жидких кристаллах.

Более того, данные комплексы могут эффективно использоваться для диагностирования плоских средств отображения информации других типов (электролюминесцентных, плазменных, светодиодных, полевых эмиссионных, электро- и фотохромных). При этом для конкретного применения необходимо индивидуальное программное обеспечение.

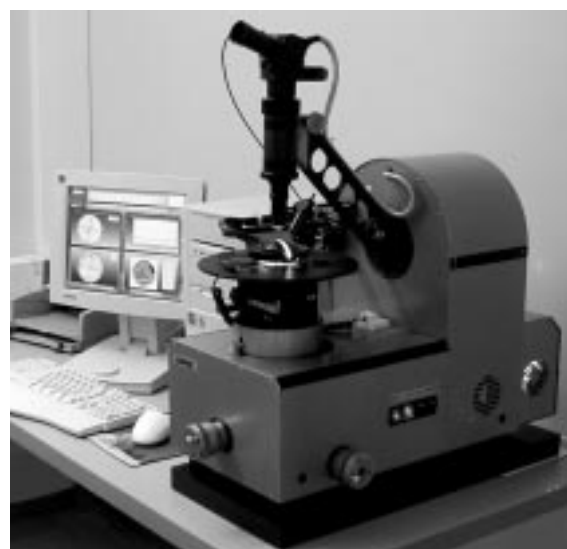


Рис. 6. Измерительно-вычислительный комплекс СМ-100

Комплексы СМ-100 позволяют измерять следующие параметры ЖК-дисплеев:

- статические вольт-яркостные и вольт-контрастные характеристики;
- предельные уровни мультиплексирования при заданном контрасте;
- предельные значения контраста при заданных уровнях мультиплексирования;
- время реакции и релаксации элементов индикации и их зависимость от значения и формы управляющих сигналов;
- индикатрисы контраста при работе приборов как на пропускание, так и на отражение;
- зависимость углового распределения контраста от значения и формы управляющих воздействий;
- зависимость контраста ЖК-экранов с активной матричной адресацией от специфических условий управления;
- оптимальные параметры электрических сигналов управления для шестиуровневой схемы управ-

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Техническая спецификация измерительно-вычислительного комплекса СМ-100

Механизм позиционирования Угол наклона микроскопа, ° Точность установки угла, ° Вращение образца, ° Перемещение образца в горизонтальной плоскости, мм Максимальный размер исследуемого образца, мм: диагональ толщина	0—70 1 0—360 +15 340 1—15
Освещение образца	Диффузное или коллимированное освещение для режима работы на просвет или на отражение
Источник света	Галогенная лампа, 100 Вт
Размер измеряемого элемента отображения, мм	0,1—5
Фотоприемное устройство	Фотоумножитель R3350A (Hamamatsu)
Параметры управляющего электрического сигнала Форма Максимальная частота Максимальное управляющее напряжение, В Максимальный ток нагрузки, А	Постоянное напряжение, меандр, мультиплексная форма (A11&P1сзпко) 50 кГц для меандра 100 Гц для мультиплексной формы при количестве строк дисплея $N=512$ ± 120 с точностью 5,0 мВ 0,015 при емкости нагрузки 15 нФ
Персональный компьютер Операционная система	PC Pentium 1000 МГц, 256 RAM Windows 95/98/2000
Габаритные размеры комплекса, мм	450×600×300

ления матричными ЖК-экранами, обеспечивающие максимальное значение контрастного отношения;

— зависимость контраста от формы управляющего сигнала для ЖК-экранов с реализацией полутонного изображения с числом градаций серого 8—64.

Первые версии комплекса (ДЖИП-1) успешно прошли апробацию в НИИ «Волга» (г. Саратов). Последующие модификации комплексов (СМ-100) работают в Белоруссии (ПО «Интеграл»), в Корее (Samsung), в Индии (Hitronics Enterprises). Последние модификации комплекса успешно эксплуатируются в Швеции (Swedish LCD Center) и в Гонконге (Bona Fide) и представляют собой совершенные приборы, которые отвечают современным требованиям, предъявляемым к диагностическим приборам аналогичного класса, как по функциональным возможностям, так и по дизайну.

При создании последней версии комплекса (рис. 6) были решены следующие задачи:

— разработаны эффективные методы и алгоритмы исследования основных электрооптических параметров ЖК-элементов отображения информации, работающих на основе практически всех известных электрооптических эффектов в нематических, смектических ЖК и в холестерико-нематических смесях;

— реализованы автоматическое измерение всех основных параметров и характеристик, обработка результатов измерений и выдача информации об оптимальных эксплуатационных параметрах ЖК-экранов;

— обеспечена работа комплекса в диалоговом режиме с оператором;

— выработаны формы электрических сигналов управления, соответствующие реальным сигналам

управления, а также предусмотрена возможность синтеза любой заданной формы сигнала;

— осуществлено соответствие математического обеспечения комплекса стандартным методикам измерения, обработки и описания характеристик, а также ряду новых физически обоснованных нестандартных методик;

— разработаны пакеты прикладных программ, обеспечивающие: измерение в автоматическом режиме всех характеристик дисплеев; вывод на дисплей и печатающее устройство информации о любых характеристиках исследуемого объекта (предусмотренных перечнем параметров и характеристик) в удобной для анализа форме; формирование характеристик и вывод их на печатающее устройство в заданных масштабе, формате и диапазоне переменных величин; корректировку и форматирование графиков, таблиц, подписей; ввод дополнительных данных; создание базы данных для анализа и сравнения характеристик, измеренных за длительный промежуток времени.

В таблице приведена техническая спецификация комплекса СМ-100.

Состав комплекса СМ-100

Механизм позиционирования обеспечивает вращение столика с укрепленным на нем образцом в азимутальной плоскости в диапазоне углов от 0 до 360° и наклон измерительного микроскопа относительно нормали к образцу в диапазоне от 0 до 70°. Вращение в азимутальной и полярной плоскостях осуществляется шаговыми двигателями с редукторами. Точность установки как азимутального, так и полярного углов составляет 1°.

Ось вращения столика имеет возможность смещаться в горизонтальной плоскости в диапазоне

± 15 мм с точностью 5 мкм, что необходимо для точного ее совмещения с оптической осью измерительного микроскопа. Дополнительный двухкоординатный транслятор позволяет перемещать исследуемый образец в горизонтальной плоскости (для совмещения центра исследуемого элемента изображения с оптической осью микроскопа) без изменения оси вращения столика. Специальный высокоточный подъемник вращающегося столика перемещает столик в вертикальном направлении для совмещения плоскости исследуемого образца с плоскостью вращения измерительного микроскопа. Благодаря этому минимизируется параллакс при измерениях под большими полярными углами. Ход высокоточного подъемника обеспечивает расстояние до 45 мм между плоскостью вращающегося столика и осью вращения измерительного микроскопа. Это позволяет установить на вращающемся столике специальную систему нагрева-охлаждения образца, высота которой составляет 40—43 мм, и, как следствие, измерять электрооптические параметры дисплея при различных температурах.

Измерительный микроскоп представляет собой четырехканальную оптическую систему, которая с помощью одного оптического переключателя направляет изображение исследуемого объекта в окуляр, фотоэлектронный умножитель, спектрометр или в резервный канал. Другой оптический переключатель управляет диафрагмами микроскопа и дискретно изменяет диаметр исследуемого элемента изображения в пределах 100, 400, 800 мкм и 4 мм. Измерительный микроскоп соединяется с фотоумножителем и спектрометром с помощью волоконно-оптического кабеля.

Осветительная система состоит из галогенной лампы накаливания, установленной в специальном блоке осветителя, который снабжен оптической фокусирующей системой и четырехпозиционным оптическим переключателем. Световые потоки от осветителя по волоконно-оптическим жгутам направляются в коллиматоры и диффузно отражающие сферы, устанавливаемые под исследуемым объектом и над ним. Это обеспечивает измерение при следующих режимах подсветки образца:

- подсветка образца диффузно рассеянным светом при работе на просвет (рис. 4, а);
- подсветка образца диффузно рассеянным светом при работе на отражение (рис. 4, б);
- подсветка образца коллимированным светом при работе на просвет (рис. 5, а);
- подсветка образца коллимированным светом при работе на отражение (рис. 5, б). В этом случае диапазон углов падения коллимированного светового потока относительно нормали к исследуемому образцу составляет 15—50°;
- различные варианты комбинированной подсветки образца.

Электронное обеспечение комплекса. Электронные узлы и блоки, установленные в корпусе комплекса, управляются компьютером и включают: источники питания; контроллер; схемы управления ша-

говыми двигателями; электронный преобразователь тока в напряжение для фотоэлектронного умножителя; высоковольтный усилитель управляющих сигналов; высоковольтный блок питания фотоэлектронного умножителя.

Спектрометрическое оборудование. Разработанный спектрометр представляет собой самостоятельный прибор и может использоваться как составная часть комплекса или индивидуально. Для повышения чувствительности спектрометра и уменьшения шумов его фотоприемная часть (ПЗС-матрица CCD ILX-511 с 2048 элементами) соединена с термоэлектрической охлаждающей системой. Рабочая температура ПЗС-матрицы составляет 15°C и поддерживается специальной электронной схемой стабилизации температуры. Время, необходимое для стабилизации температуры, составляет 2 мин с момента включения спектрометра. Диапазон исследуемых длин волн спектрометра 400—800 нм, точность 0,5 нм. Соединяющий с измерительным микроскопом волоконно-оптический кабель имеет длину 1,3 м и диаметр 0,6 мм. Спектральная область пропускания световода составляет 300—1100 нм.

Система термостатирования измеряемых образцов создана для обеспечения измерения параметров дисплеев в диапазоне температур от -30 до +90°C. Система состоит из термосталика и электронного блока управления. Термосталик представляет собой двухступенчатую систему термоэлементов, которая позволяет быстро устанавливать заданную температуру. Нижняя часть системы соединена с водоохлаждаемым радиатором, а верхняя — с медной пластиной, покрытой никелем. После укрепления исследуемого образца на верхней пластине термосталик накрывается специальной термоизолирующей крышкой. В нижней и верхней части термосталика и в крышке выполнены отверстия диаметром 10 мм со стеклянными окнами для пропускания светового потока при работе на отражение или на просвет.

Блок электронного управления системой содержит процессор, программа которого обеспечивает необходимый закон регулирования температуры, схему управления током термоэлементов, клавиатуру для установки требуемых режимов работы и дисплей для контроля текущего значения температуры.

Необходимым условием нормальной работы термосталика является водоохлаждение радиатора. Подключение воды осуществляется тонким гибким шлангом. Потребление воды — не более 0,5 л/мин. Система автоматически выключается при недостатке воды или при достижении температуры воды 55°C.

Компьютер с дополнительным электронным модулем. Комплекс CM-100 использует стандартный PC Pentium для управления электронными, механическими и оптическими компонентами. Дополнительный электронный модуль, состоящий из аналого-цифрового и цифроаналогового преобразователей, контроллера, блока питания и интерфейса, выдает управляющие сигналы на высоковольтный усилитель, принимает информацию с фотодетектора, обеспечивает связь и управление спектрометром и тер-

мостоликом. Компьютер с помощью программного обеспечения запоминает, обрабатывает, оценивает результат измерений и выдает информацию на монитор или на принтер.

Программное обеспечение создано на современном уровне, простое в обучении и пользовании, Windows-ориентированное, состоит из большого числа меню, содержит обширную базу данных, редакторы и графопостроители, позволяет быстро обрабатывать и корректировать результаты измерений, проводить сравнение с выбранными характеристиками и многое другое. При дальнейшей модернизации комплекса программное обеспечение легко адаптируется.

Созданный измерительно-вычислительный комплекс СМ-100 позволяет проводить эффективную диагностику не только новых жидкокристалличе-

ских материалов и дисплеев на их основе, но и других плоских средств отображения информации — при несложной доработке конструкции и программного обеспечения.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Autronic-Melcher Display Measuring System DMS Series 500 and 700.— Karlsruhe: 1995, Release 2.
2. Sorokin V., Starodub N. Liquid crystal display measuring system.— Proc. of the VI Intern. Symposium on Advanced Display Technologies.— Partenit.— 1997.— С. 158—163.
3. Sorokin V. Liquid crystal display measuring system.— Proc. of the VII Intern. Symposium on Advanced Display Technologies.— Novy Svit.— 1999.— С. 1—12.
4. Сорокин В. М., Зелинский Р. Я. Диагностирование жидкокристаллических дисплеев. Измерительно-вычислительные комплексы // Электроника: Наука. Технология. Бизнес.— 2003.— № 4.— С. 40—45.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ



11-я Международная специализированная выставка АВТОМАТИЗАЦИЯ—2008. ЭЛЕКТРОНИКА—2008 01.04 — 04.04 2008

Организаторы: Выставочная компания "Минскэкспо" при поддержке Министерства промышленности Республики Беларусь, Национальной Академии наук Беларуси

Место проведения: г. Минск, пр. Победителей, 14, выставочный павильон
Выставочная компания "Грин Экспо", 220015, Беларусь, г. Минск, а/я 242
E-mail: info@greenexpo.by

АВТОМАТИЗАЦИЯ

- ✦ Автоматизированные системы и технические средства управления производством и технологическими процессами.
- ✦ Промышленные контроллеры.
- ✦ Системы контроля, регулирования и управления.
- ✦ Промышленная автоматизация. Роботы. Манипуляторы. Периферийное оборудование. Лазерная техника. Обработка изображений в промышленном процессе.
- ✦ Обеспечение и контроль качества.
- ✦ Информационные технологии и программное обеспечение: системы CAD/CAM, базовые системы и средства разработки программ, инжиниринг, услуги и сервис.

ЭЛЕКТРОНИКА

Электронные компоненты, комплектующие.

- ✦ Полупроводниковые устройства.
- ✦ Электромеханические компоненты и технологии соединений.
- ✦ Встроенные системы.
- ✦ Датчики и микросистемы.

- ✦ Источники питания.
- ✦ Печатные платы и другие платы для монтажа.
- ✦ Пассивные компоненты.
- ✦ Оборудование и программное обеспечение — тестирование измерений.
- ✦ Узлы и подсистемы.

Технологическое оборудование, материалы и инструменты для производства электронной промышленности.

- ✦ Производство полупроводников.
- ✦ Микросистемная технология.
- ✦ Обработка материалов.
- ✦ Производство компонентов, технологии для обработки кабелей.
- ✦ Технологии производства печатных плат и других носителей схем.
- ✦ Технология монтажа компонентов на поверхность плат.
- ✦ Технология пайки.
- ✦ Чистовая обработка изделий.
- ✦ Испытания и измерения.

К. т. н. Б. А. ШАНГЕРЕЕВА

Россия, г. Махачкала, Дагестанский гос. технический ун-т
E-mail: bijke@mail.ruДата поступления в редакцию
02.04—20.11 2007 г.Оппонент д. х. н. В. Н. ТОМАШИК
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)ДИФФУЗИЯ ФОСФОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ
ТВЕРДОГО ПЛАНАРНОГО ИСТОЧНИКА
В ПРОИЗВОДСТВЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Полученные оптимальные технологические режимы процесса диффузии фосфора с применением твердого планарного источника позволяют получать транзисторы с улучшенными электрофизическими характеристиками.

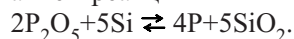
При изготовлении полупроводниковых приборов и интегральных схем часто проводят диффузию различных примесных элементов в исходный монокристаллический полупроводниковый материал (германий, кремний, арсенид галлия и др.). Диффузия примесей необходима и для получения полупроводникового материала определенного типа проводимости, создания в нем активных областей с требуемой концентрацией носителей заряда определенного знака, образования в объеме монокристалла p - n -переходов.

Для осуществления диффузии фосфора кремниевую пластину помещают в нагретую до высокой температуры кварцевую трубу диффузионной печи и через нее пропускают пары легирующей примеси, которые адсорбируются на поверхности пластины и затем диффундируют в кристаллическую решетку.

Отличительной особенностью диффузии фосфора в планарной технологии является то, что примесь вводят в кремниевую пластину локально, в ограниченные защитной маской окна, а сам процесс осуществляется в две стадии: предварительная загонка нужного количества примесей и последующая разгонка на требуемую глубину для достижения необходимого уровня концентрации.

Диффузаны, используемые для формирования легированных слоев p - и n -типа в технологии изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, представляют собой соединения донорной примеси с водородом, галогеном, кислородом или другими элементами. Они подразделяются на газообразные, жидкие и твердые [1, 2].

Твердые планарные источники диффузии фосфора при нагревании выделяют пятиокись фосфора в газовую фазу. Молекулы P_2O_5 диффундируют к поверхности кремниевых пластин с последующим протеканием реакции



В результате образуется слой фосфорно-силикатного стекла, из которого происходит диффузия фосфора в объем кремния [2, с. 178, 179; 3].

При базовом технологическом процессе формирования активной области n -типа для мощных транзисторов используется жидкий диффузат $POCl_3$ (оксихлорид фосфора), что создает проблемы в управлении технологическим процессом и приводит к получению нестабильных результатов. В связи с этим нами была проведена работа по определению оптимальных технологических режимов диффузии фосфора с применением твердого планарного источника.

Основными технологическими факторами, влияющими на процесс диффузии и на параметры получаемой структуры, являются температура проведения процесса, время, расстояние между источником примеси и пластиной в кварцевой cassette и расход технологических газов. Основными контролируруемыми параметрами в нашем случае являлись глубина залегания p - n -перехода (x_j , мкм) и поверхностное сопротивление диффузионного слоя (R_s , Ом/□). Полученные экспериментальные данные приведены в табл. 1.

Из анализа полученных результатов можно сделать вывод, что с увеличением расстояния между источником примеси и пластиной при постоянных температуре и времени процесса глубина p - n -перехода уменьшается. Увеличение температуры и времени проведения процесса при неизменном расстоянии между источником примеси и пластиной приводит к возрастанию глубины p - n -перехода.

Таблица 1

Технологические режимы активной области диффузии фосфора

Газ	Расход газа, л/ч	Темпе- ратура, °C	Время, мин	Сопротивление R_S , Ом/□
Загонка фосфора				
Кислород	37,8	1100	60	0,60±0,05
Азот	740			
Водород	7,5			
Разгонка фосфора				
Кислород	37,8	1250	60×90	0,25±0,05
Азот	740			
Водород	7,5			

Для проведения диффузии фосфора пластины после химической обработки загружали в кварцевую кассету. Вначале загружали пластины твердого планарного источника (ТПИ), а затем кремниевые пластины. Расстояние между пластиной ТПИ и кремниевой пластиной составляло 4,0 мм. Контроль R_s проводили по пяти точкам на каждой пластине с использованием установки FPP-5000.

Из рис. 1 видно, что с увеличением температуры процесса и времени его проведения сопротивление диффузионного слоя уменьшается. Для заданного сопротивления диффузионного слоя ($0,6 \pm 0,1$ Ом/□) при формировании активной области диффузии фосфора температура процесса составляет 1100°C и время его проведения — 60 мин, а для разгонки ($0,25 \pm 0,05$ Ом/□) температура процесса равна 1250°C и время его проведения — 90 ч.

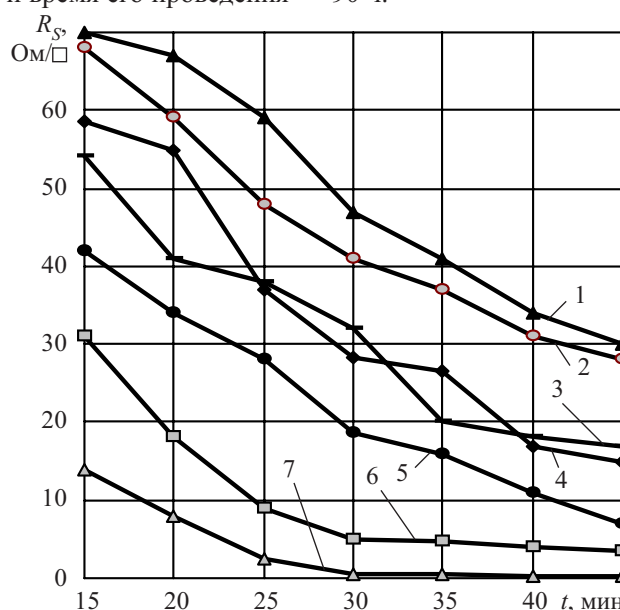


Рис. 1. Зависимость поверхностного сопротивления от времени проведения процесса загонки фосфора при различной температуре:

1 — 900°C ; 2 — 900°C (расчет); 3 — 950°C (расчет); 4 — 950°C ; 5 — 1000°C ; 6 — 1050°C ; 7 — 1100°C

Для определения зависимостей поверхностного сопротивления от времени и температуры процесса при разгонке использовали пластины после загонки фосфора. На этапе загонки необходимо получить поверхностное сопротивление диффузионного слоя, равное $0,6 \pm 0,05$ Ом/□, а на этапе разгонки оно должно составлять $0,25 \pm 0,025$ Ом/□. Для этого использовали рабочие пластины после операции загонки фосфора и проводили процесс разгонки, изменяя температуру и время проведения процесса (рис. 2).

Для определения зависимости поверхностного сопротивления от глубины залегания p - n -перехода использовались пластины после разгонки фосфора.

Из анализа полученных зависимостей видно (рис. 1, 2), что при увеличении температуры проведения процесса и уменьшении поверхностного сопротивления глубина залегания диффузионного слоя увеличивается. Необходимую глубину залегания, находящуюся при загонке фосфора в пределах $x_j = 60$ мкм,

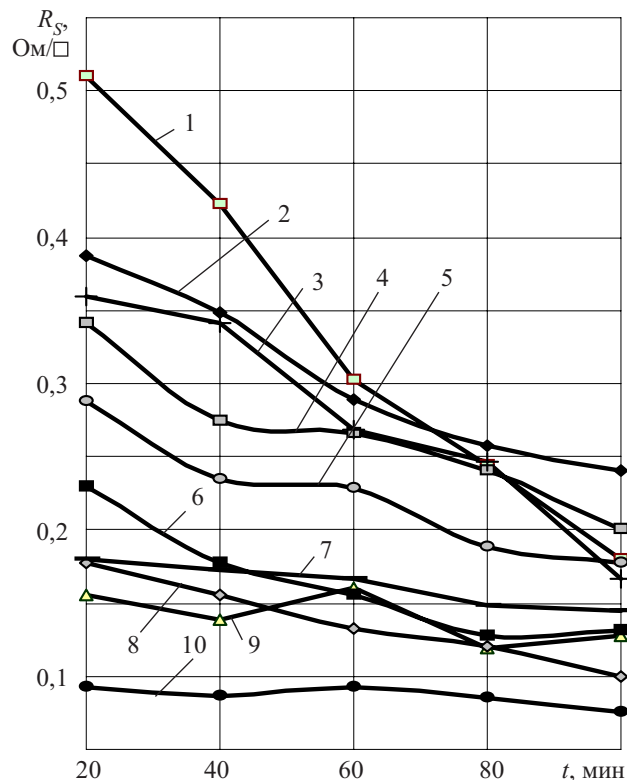


Рис. 2. Зависимость поверхностного сопротивления от времени проведения процесса разгонки фосфора при различной температуре:

1 — 1300°C ; 2 — 1250°C ; 3 — 1250°C (расчет); 4 — 1150°C (расчет); 5 — 1200°C (расчет); 6 — 1150°C ; 7 — 1300°C (расчет); 8 — 1100°C (расчет); 9 — 1200°C ; 10 — 1100°C

получали при температуре проведения процесса 1100°C и времени 30 мин, а при разгонке глубину залегания p - n -перехода $x_j = 100 \pm 10$ мкм получали при 1250°C в течение 90 ч при соответствующем поверхностном сопротивлении.

Оптимальные режимы проведения процесса диффузии фосфора с применением твердого диффузанта фосфора (ТПИ) приведены в табл. 2. После окончания разгонки фосфора проводили измерение глубины диффузии методом косого шлифа [2]. Глубина диффузии соответствовала 100 мкм.

Таблица 2

Оптимальные технологические режимы проведения процесса диффузии фосфора

Диффузия фосфора	Поверхностное сопротивление R_s , Ом/□	Температура процесса, $^\circ\text{C}$	Время	Глубина диффузионного слоя, мкм
I стадия (загонка)	$0,60 \pm 0,05$	1100	60 мин	20—25
II стадия (разгонка)	$0,25 \pm 0,025$	1250	90 ч	100 ± 10

По результатам исследования определены оптимальные технологические режимы диффузии фосфора с применением ТПИ (табл. 3) для формирования активной области силового кремниевого тран-

Оптимальные технологические режимы проведения диффузии фосфора с использованием твердого планарного источника

Операция	Режим
Формирование партии пластин и химическая обработка пластин	Химическая обработка в двух ваннах: в 1-й ванне раствор $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2=10:1$ при 125°C ; во 2-й ванне раствор $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:4:20$ при 65°C Время обработки — по 5 мин в каждой ванне
Диффузия фосфора (I стадия)	Расход газов: O_2 — $37,8 \pm 0,5$ л/ч; N_2 — 740 л/ч; H_2 — 7,5 л/ч; температура процесса 1100°C ; время процесса 60 мин
Снятие фосфорносиликатного стекла, измерение поверхностного сопротивления и глубины диффузионного слоя	В растворе $\text{HF}:\text{H}_2\text{O} (1:5)$; время снятия определяется по скатыванию раствора с пластины (1—1,5 мин); контроль поверхностного сопротивления проводится на установке FPP-5000: $R_s=0,6 \pm 0,1$ Ом/□; измерение глубины диффузионного слоя (шар-шлиф): $x_f=20 \dots 25$ мкм
Химическая обработка пластин и пирогенное окисление [$\delta(\text{SiO}_2)=2$ мкм]	В двух ваннах: в 1-й ванне раствор $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2=10:1$ при 125°C , во 2-й — раствор $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:4:20$ при 65°C ; по 5 мин в каждой ванне; окисление при 1000°C , время окисления — 320 мин
Диффузия фосфора (II стадия)	Расход газов: O_2 — $37,8 \pm 0,5$ л/ч; N_2 — 740 л/ч; температура процесса 1260°C ; время разгонки — 60 ч
Полное снятие окисла; измерение поверхностного сопротивления; измерение глубины диффузионного слоя (методом косого шлифа)	В буферном растворе $\text{NH}_4\text{F}:\text{HF}=6:1$; контроль поверхностного сопротивления на установке FPP-5000: $R_s=0,25 \pm 0,025$ Ом/□; измерение глубины диффузионного слоя под микроскопом «Эрголюкс» и с помощью шаблона: $x_f=100 \pm 10$ мкм

зистора, при которых обеспечивается глубина диффузионного слоя 100 ± 10 мкм.

Анализ результатов исследований показал, что способ диффузии фосфора с использованием жидких источников характеризуется сильной зависимостью параметров диффузионных слоев от кинетики реакции взаимодействия паров диффузанта с кислородом в диффузионной трубе, а также влиянием ряда других технологических факторов (температура жидкого диффузанта, скорость и состав газового потока, геометрия расположения кремниевых пластин). В связи с этим диффузия примесей из твердого планарного источника представляет наибольший интерес при получении однородных структур на пластинах кремния большого диаметра.

Представленная технология проведения процесса диффузии фосфора с применением твердого планарного источника обеспечивает ряд существенных преимуществ:

— улучшение управляемости процессом диффузии фосфора, что позволяет повысить пробивное напряжение $p-n$ -переходов;

— увеличение коэффициента усиления на пластинках и в партиях;

— снижение плотности структурных дефектов в $p-n$ -переходах и понижение величины коэффициента шума;

— значительное понижение токсичности процесса;

— высокая производительность за счет максимального использования рабочей зоны диффузионной трубы.

Таким образом, полученные оптимальные технологические режимы процесса диффузии фосфора с применением твердого планарного источника позволяют получать транзисторы с улучшенными электрофизическими характеристиками.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров / Под ред. В. Н. Черняева. — М.: Радио и связь, 1987.
2. Курносов А. И. Материалы для полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. — М.: Высшая школа, 1980.
3. Готра 3. Ю. Технология микроэлектронных устройств / Справочник. — М.: Радио и связь, 1991.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Вильнав Ж.-Ж. Клеевые соединения. — М.: Техносфера, 2007. — 384 с.

Книга состоит из двух частей: теоретической и практической. В первой рассматриваются теоретические модели адгезии, комплекс проблем, связанных с обеспечением межфазного контакта и влияние структуры полимеров на когезионную прочность. Во второй части приведены практические рекомендации по склеиванию. Подробно рассмотрены методы подготовки поверхностей, изложены общие принципы выбора клеев и приведены характеристики основных видов клеящих материалов. В каждой главе читатель найдет ссылки на web-ресурсы.

Книга предназначена для преподавателей, студентов, конструкторов и технологов промышленных предприятий.



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

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

Дата поступления в редакцию
19.07 2007 г.

Оппонент В. П. СОБОЛЬ
(ЦКБ «Арсенал», г. Киев)

МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ УФ-РАДИОМЕТРОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ

С учетом наиболее весомых факторов влияния на метрологические характеристики радиометров разработана методика калибровки — передачи размера единицы энергетической освещенности УФ-радиометрам.

При разработке и изготовлении средств измерительной техники (СИТ) производится их калибровка, метрологическая аттестация и последующие поверки с целью установления пригодности СИТ к применению. Термины *метрологическая аттестация*, *поверка* и *калибровка* СИТ в метрологии употребляются как самостоятельные термины. Однако в техническом приложении понятия эти достаточно близки — это определение метрологических характеристик СИТ и установление пригодности этих средств к применению. Поэтому для упрощения в данной работе термин *калибровка* употребляется как процесс передачи размеров единицы измерений средствам измерительной техники.

Достаточно распространенным в производстве методом передачи измеряемой величины является метод сравнения исследуемого средства измерений с рабочим (или исходным) эталоном. При этом аттестация рабочего эталонного средства измерений производится при определенных условиях и режимах, которые должны быть возобновлены при использовании такого эталона на рабочем месте.

Порядок передачи размера единицы энергетической освещенности средствам измерения этого параметра или, как мы условились, порядок калибровки, приводится в стандартах [1, 2]. В качестве рабочего эталона часто используются неселективные приемники излучения — пирозлектрические приемники, термисторные болометры, термоэлементы, оптико-акустические преобразователи. Эти приемники используются и как первичные преобразователи излучения оптического диапазона в широкополосных (по длинам волн) радиометрах. При этом конфигурация «эталон—исследуемое средство измерительной техники» является согласованной системой в метрологии, и присвоенная единица измеряемой величины СИТ не зависит от спектрального состава излучения.

Если в качестве фотоприемника средства измерения энергетической освещенности используется селективный приемник, то наименьшее отклонение спектрального состава измеряемого источника излучения от спектрального состава источника, который использовался при калибровке СИТ, приводит к увеличению погрешности измерения энергетической освещенности. То же происходит, если эталон используется при определении энергетической освещенности для передачи ее величины исследуемому СИТ с более узким спектральным диапазоном чувствительности, чем спектральный диапазон чувствительности эталона. К таким средствам измерений относятся, например, радиометры, предназначенные для измерения энергетической освещенности в видимом или ультрафиолетовом (УФ) диапазонах. УФ-диапазон в свою очередь делится на поддиапазоны: 220—280 нм (поддиапазон С), 280—320 нм (поддиапазон В) и 320—400 нм (поддиапазон А) [3, 4].

Рассмотрим проблемы, возникающие при калибровке УФ-радиометров.

Из результатов исследований параметров приемников, чувствительных в УФ-диапазоне [5], видим, что для УФ-радиометров лучше всего подходят фотодиоды на основе селенида цинка и фосфида галлия. Их преимущество очевидно — это относительно высокая чувствительность и ограниченная спектральная характеристика чувствительности в длинноволновой части спектрального диапазона, что является важным при формировании поддиапазонов.

Однако их спектральные характеристики чувствительности являются селективными, и воспроизвести форму спектральной характеристики идеальной (теоретической) радиометрической головки (РГ) УФ-радиометра при помощи корректирующих светофильтров очень сложно. Это было бы возможно при условии, что светофильтр вне рабочего диапазона будет непрозрачным, а в рабочей области будет иметь спектральную характеристику пропускания, которая описывается соотношением

$$\tau_{\lambda} = \frac{1}{S_{\lambda}}, \quad (1)$$

где τ_{λ} — спектральный коэффициент пропускания корректирующего светофильтра в рабочем диапазоне РГ;

S_{λ} — относительная спектральная характеристика чувствительности фотоприемника.

Однако изготовить светофильтр по заданным формулой (1) требованиям невозможно, поэтому реальные характеристики РГ отличаются от идеальных. Исследования технических параметров и характеристик УФ-радиометров, выпускаемых фирмами “ТКА” (г. С.-Петербург), “Аргус” (г. Москва) и НПФ “Тензор” (г. Черновцы), подтверждают сказанное — спектральные характеристики исследованных УФ-радиометров отличаются от идеальных и для однотипных приборов схожи между собой.

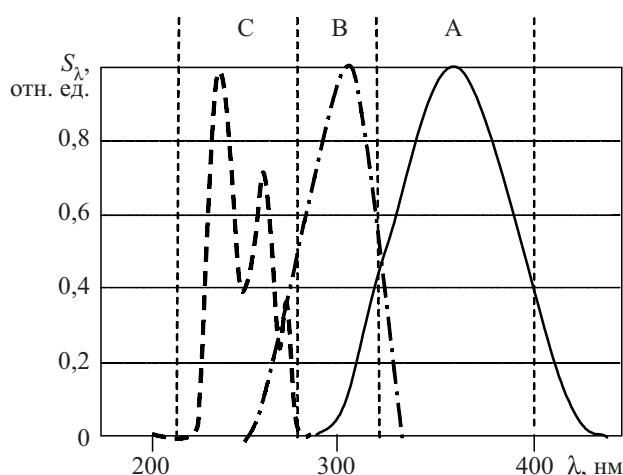


Рис. 1. Относительные спектральные характеристики чувствительности РГ в поддиапазонах А, В и С

Типовые спектральные характеристики чувствительности РГ, измеренные на спектральном комплексе КСВУ-6, приведены на рис. 1. В этом случае (случае селективности чувствительности радиометрических головок) погрешность измерений спектральной характеристики РГ и определения величины отличия спектральной характеристики реальной головки от идеальной определяют качество УФ-радиометра, т. е. определяют уровень его метрологических характеристик, а соответственно, и пригодность к применению.

Калибровку УФ-радиометров с селективной чувствительностью РГ удобно проводить при монохроматическом потоке излучения, который можно вы-

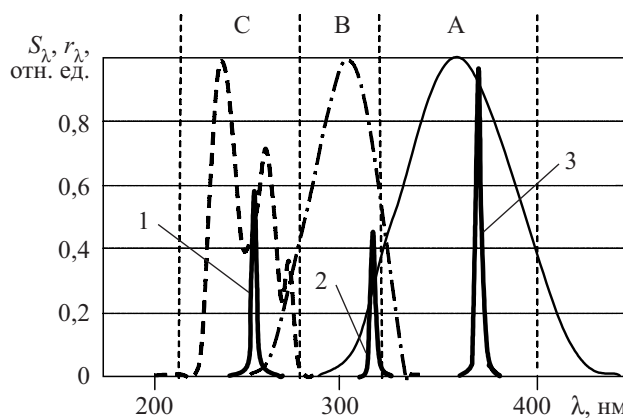


Рис. 2. Относительные спектральные характеристики чувствительности РГ (S_λ) и положения выделенных линий ртути (r_λ): 254 нм (1); 313 нм (2); 365 нм (3)

делить при помощи монохроматора или выделением линий ртути в рабочем спектральном поддиапазоне при помощи интерференционных светофильтров: в поддиапазоне С — длину волны $\lambda_{\max}=254$ нм, в поддиапазоне В — длину волны $\lambda_{\max}=313$ нм и в поддиапазоне А — длину волны $\lambda_{\max}=365$ нм.

Положение выделенных ртутных линий и спектральные характеристики чувствительности РГ приведены на рис. 2.

Рассмотрим причины, влияющие на качество калибровки спектрально-зависимых УФ-радиометров, процесс которой является довольно сложным техническим приемом.

Во-первых, необходимо качественно выделить линию, т. е. выделить только рабочую длину волны излучения и подавить остальные, попадающие в диапазон чувствительности РГ. Для этой цели подходят интерференционные светофильтры, изготовленные Казанским оптико-механическим заводом.

Спектральные характеристики пропускания фильтров были измерены на спектральном комплексе КСВУ-6. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Спектральные характеристики пропускания интерференционных светофильтров

Параметры	Спектральные поддиапазоны		
	$\lambda_{\max}=365$ нм (А)	$\lambda_{\max}=313$ нм (В)	$\lambda_{\max}=254$ нм (С)
$\lambda_{\max} (\tau_{\max})$	364 нм ($\tau=18\%$)	314 нм ($\tau=29\%$)	254 нм ($\tau=27\%$)
$\Delta\lambda_{0,5}$	360—369 нм	310—318 нм	245—275 нм
$\Delta\lambda_{0,1}$	357—375 нм	307—322 нм	222—285 нм
$\Delta\lambda_{0,001}$	200—355 нм; 375—500 нм	200—305 нм; 325—500 нм	200—315 нм; 390—500 нм

Отметим, что при полуширине ртутных линий $\Delta\lambda_{0,5\text{Hg}}$, не превышающих 3 нм, незначительные отклонения положений максимумов пропускания фильтров $\lambda_{\max}$ в диапазонах А и В при полном подавлении излучения других линий ($\Delta\lambda_{0,001}$) не влияют на качество выделения рабочих линий излучения. Немного хуже выделяется ртутная линия с длиной волны 254 нм — при полуширине спектральной характеристики фильтра, равной 30 нм, на радиометрическую головку попадают потоки излучения соседних линий с максимумами 265 и 280 нм, которые по мощности излучения немного меньше (на 30—50%) мощности излучения рабочей линии. Однако при близких формах спектральной характеристики чувствительности эталонной и испытуемой радиометрических головок это отличие учитывается при калибровке УФ-радиометра автоматически.

Во-вторых, как видно из рис. 2, линии ртути не совпадают с максимумами чувствительности РГ.

В процессе исследований спектральных характеристик чувствительности УФ-радиометров типа УФР-21, выпускаемых фирмой “Тензор”, (более 50 шт.) и ТКА-АВС, выпускаемых фирмой «ТКА», (4 шт.) были установлены пределы изменения величин относительной чувствительности РГ на рабочих

Таблица 2
Спектральная чувствительность РГ на рабочих
длинах волн, отн. ед.

Тип УФ- радиометра	$S_{\lambda}=365$ нм	$S_{\lambda}=313$ нм	$S_{\lambda}=254$ нм
УФР-21	0,89—0,98	0,64—0,82	0,44—0,94
ТКА-АВС	0,90—1,00	0,52—0,79	0,49—0,97

длинах волн. В табл. 2 приведены результаты измерений.

Меньший диапазон изменения чувствительности РГ на длине волны $\lambda_{\max}=365$ нм объясняется меньшим отличием формы спектральных характеристик фотоприемников, используемых в РГ, и более широким спектральным поддиапазоном А (320—400 нм), а соответственно и более пологими фронтами спектральных характеристик.

На длине волны $\lambda_{\max}=313$ нм диапазон изменения чувствительности РГ больше из-за более узкого спектрального поддиапазона В (280—320 нм), и незначительные изменения формы спектральной характеристики фотоприемника или корректирующего фильтра приводят к увеличению разброса чувствительности РГ на длине волны калибровки.

Применение интерференционных фильтров на спектральный поддиапазон С (200—280 нм) приводит к еще большему разбросу чувствительности РГ. Причина в том, что излучение на длине волны $\lambda_{\max}=254$ нм приходится на крутой фронт или на провал спектральной характеристики пропускания фильтра. Поскольку на сегодня производителям фильтров не удается изготовить более качественные фильтры, разработчикам оптико-электронных измерительных приборов приходится вводить поправочные коэффициенты.

В-третьих, уровень метрологических характеристик УФ-радиометров зависит от качества воспроизведения формы спектральной характеристики

чувствительности реальной РГ и степени отличия ее от формы идеальной (теоретической) головки.

Так как фотосигнал на выходе измерительной РГ определяется по формуле

$$I_{\tau} = \int_{\lambda=200}^{\lambda=500} S_{\lambda} r_{\lambda} \cdot d\lambda, \quad (2)$$

где I_{τ} — фототок на выходе РГ, А;

S_{λ}^{ABC} — спектральная чувствительность РГ, работающей в поддиапазонах А, В и С, соответственно, А/Вт;

r_{λ} — спектральное распределение излучения в диапазоне чувствительности фотоприемника, используемого в РГ, Вт,

то при воздействии на спектрально-зависимую радиометрическую головку потоков разнотипных источников УФ-излучения (например, с одинаковой интегральной мощностью) получим разные фотосигналы. (Типы источников и виды их спектральных характеристик приведены в табл. 3.) Иными словами, такой радиометр будет вносить большую погрешность в измерения, чем задекларированная в технической документации.

Отличие формы относительной спектральной характеристики чувствительности реальной РГ (см. рис. 1) от формы для идеальной (теоретической) головки ($S_{\lambda_i}=1$ — в рабочем диапазоне, $S_{\lambda_i}=0$ — вне диапазона) в процессе измерений можно учесть вводом коэффициента отличия для каждого типа источника излучения. Коэффициент отличия определяется расчетным путем как отношение фотосигналов, полученных при действии данного типа источника излучения на идеальную и реальную головки.

Коэффициенты отличия приведены в табл. 4. Заметим, что чем больше коэффициент K отличается от 1, тем больше влияние незначительного изменения спектрального состава источников на точность измерений.

Таблица 3

Типы источников излучения и их спектральные характеристики

Тип источника излучения	Приблизительный вид распределения излучения в УФ-диапазоне
1. Газоразрядные ртутные лампы без люминофоров (ДРТ, ДРШ, СВДШ)	
2. Дейтериево-водородные лампы (ДАС-30, ЛД(Δ) и др.)	
3. Источники излучения с нормальным законом спектрального распределения плотности излучения (распределение, близкое к абсолютно черному телу — АЧТ): — Солнце за атмосферой; — электрические дуги; — дуговые газоразрядные лампы (ДКсШ, ДКрШ); — АЧТ (с $T_{\text{АЧТ}}$ от 2000 до 6000 К); — лампы накаливания с кварцевой колбой (лампы типа КГМ)	
4. Газоразрядные ртутные лампы с люминофорами (ЛД, ЛТБ, ЛБ, ЛХБ и т. п.)	

Таблица 4

Коэффициенты отличия (K) спектральной чувствительности реальной головки от идеальной

Тип источника излучения	Тип УФ-радиометра	Спектральные поддиапазоны		
		A	B	C
Ртутная лампа	УФР-21	0,94—0,98	0,83—1,01	1,51—1,77
	ТКА-АВC	1,02—1,07	0,98—1,09	1,58—1,95
Солнце	УФР-21	0,96—1,13	0,80—1,01	0,99—1,71
	ТКА-АВC	1,16—1,25	0,94—1,07	1,15—2,33
Дейтериево-водородная лампа	УФР-21	0,96—0,99	0,97—1,02	2,02—2,22
	ТКА-АВC	1,12—1,16	1,08—1,15	1,91—3,01

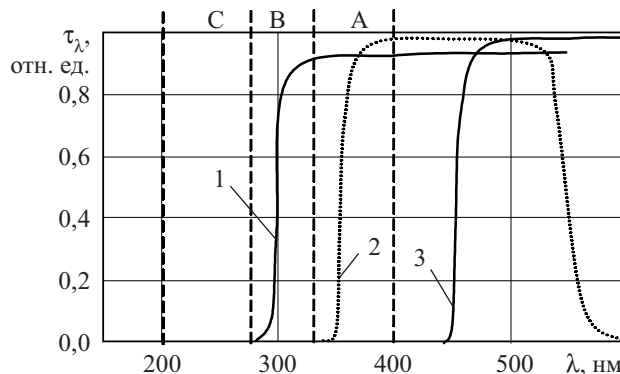


Рис. 3. Спектральные характеристики светофильтров: 1 — органическое стекло; 2 — СЗС-21; 3 — ЖС-11

Таблица 5

Уровень остаточной чувствительности вне рабочего диапазона

Тип источника излучения	Тип УФ-радиометра	Спектральные поддиапазоны					
		A		B		C	
		Рабочий диапазон	Вне диапазона	Рабочий диапазон	Вне диапазона	Рабочий диапазон	Вне диапазона
Ртутная лампа	УФР-21	1	0,002	1	0,01	1	0,01
	ТКА-АВC	1	0,003	1	0,03	1	0,02
Солнце	УФР-21	1	0,02	1	0,38	1	0,93
	ТКА-АВC	Данные отсутствуют					
КГМ24-150	УФР-21	1	0,10	1	0,21	1	0,91
	ТКА-АВC	1	0,10	1	0,13	1	0,99

Проблемным является и вопрос качества измерений спектральных характеристик вне рабочего диапазона РГ. Проблема в том, что при корректировании светофильтром спектральной характеристики фотоприемника вне рабочего диапазона РГ фотосигналы не достигают пороговой чувствительности измерительного тракта спектрального комплекса. Поэтому при расчете коэффициента отличия спектральной характеристики реальной РГ от идеальной не учитывается остаточная чувствительность вне рабочего диапазона.

Хотя остаточная чувствительность является малой величиной, при высокой мощности излучения вне рабочего диапазона она приводит к значительному увеличению погрешности измерений. Для определения уровня остаточной чувствительности удобно применять отрезающие светофильтры, спектральные характеристики которых приведены на рис. 3: для поддиапазона C — органическое стекло, для поддиапазона B — стекло СЗС-21 и для поддиапазона A — стекло ЖС-11 с коэффициентами ослабления рабочего диапазона $K_{осл}$ $1 \cdot 10^5$, $1 \cdot 10^6$ и $1 \cdot 10^6$ раз, соответственно [6]. В табл. 5 приведены результаты исследования остаточной чувствительности, определенной при помощи отрезающих светофильтров и пронормированной относительно чувствительности в рабочем диапазоне.

На сегодня фирмами «ТКА» (г. С.-Петербург), «Аргус» (г. Москва) калибровка УФ-радиометров производится методом сравнения с образцовыми средствами измерения, в качестве которых отобра-

ны радиометры, аналогичные калибруемым [7, 8]. Учитывая вышеприведенные результаты исследований причин ухудшения метрологических характеристик УФ-радиометров, можно сделать вывод: метод сравнения в данном случае имеет ограничения, и применять УФ-радиометры для измерений энергетической освещенности в условиях, отличных от условий калибровки, нельзя.

Нами предлагается методика калибровки УФ-радиометров, которая учитывает изменения условий измерений.

Для калибровки УФ-радиометра энергетической освещенности используется установка, структурная схема которой приведена на рис. 4.

Для качественных измерений необходимо, чтобы в плоскости крепления РГ энергетическая освещенность была не меньше 100 мВт/м^2 . Интерференционный фильтр должен обеспечивать максимальное пропускание на соответствующих длинах волн: поддиапазон A — $\lambda_{\max}^A = 365 \text{ нм}$; B — $\lambda_{\max}^B = 313 \text{ нм}$;

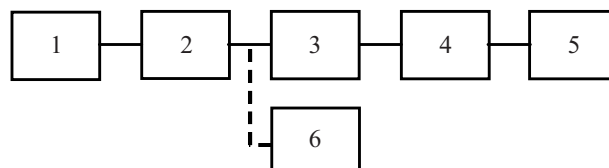


Рис. 4. Схема установки для калибровки УФ-радиометра: 1 — источник УФ-излучения (лампа типа ДРТ220); 2 — интерференционный фильтр на области A, B, C; 3 — рабочая эталонная РГ; 4 — преобразователь «ток—напряжение» ППТН-1; 5 — вольтметр типа В7-23 (В7-34); 6 — УФ-радиометр

C — $\lambda_{\max}^C = 254$ нм. Эталонная РГ должна быть аттестована по чувствительности в спектральном диапазоне от 200 до 500 нм с погрешностью не более $\pm 5\%$.

После установки интерференционного фильтра на поддиапазон C и установки на рабочую эталонную РГ (ЭРГ) диафрагмы диаметром 5—7 мм производится измерение фотосигнала U_k и рассчитывается энергетическая освещенность (E_{el}) по формуле

$$E_{el} = \frac{4U_k}{K_{пр} S_{\kappa 1} \pi d^2}, \quad (3)$$

где E_{el} — энергетическая освещенность, создаваемая потоком излучения на длине волны $\lambda_{\max}^C = 254$ нм, Вт/м²;

U_k — величина напряжения фотосигнала, измеренная вольтметром В7-23, В;

$K_{пр}$ — коэффициент преобразования ППТН-1, В/А;

$S_{\kappa 1}$ — токовая монохроматическая чувствительность ЭРГ на длине волны $\lambda_1 = \lambda_{\max}^C$, А/Вт;

d — диаметр диафрагмы, м.

Вместо ЭРГ устанавливается радиометрическая головка УФ-радиометра с насадкой 220-280, соединенной с измерительным блоком радиометра. При этом верхний срез косинусной насадки РГ УФ-радиометра должен находиться в плоскости крепления диафрагмы ЭРГ. Переключатель выбора спектрального поддиапазона измерительного блока устанавливается в положение «С» и производится измерение энергетической освещенности E_e^C , которая должна быть равной

$$E_e^C = E_{el} S_{\lambda}^C K_{\Delta PT}^C, \quad (4)$$

где E_{el} — энергетическая освещенность, рассчитанная по формуле (3), Вт/м²;

S_{λ}^C — чувствительность РГ УФ-радиометра на длине волны $\lambda_{\max}^C = 254$ нм, определенной по относительной спектральной характеристике чувствительности, отн. ед.;

$K_{\Delta PT}^C$ — коэффициент отличия формы относительной спектральной характеристики чувствительности реальной РГ (S_{λ}^C) в поддиапазоне C от формы идеальной (теоретической) головки ($S_{\lambda i}^C$) для ртутных источников УФ-излучения.

Коэффициент $K_{\Delta PT}^C$ определяется по формуле

$$K_{\Delta PT}^C = \frac{\int_{\lambda=200}^{\lambda=500} S_{\lambda i}^C r_{\lambda}^{\Delta PT} d\lambda}{\int_{\lambda=200}^{\lambda=500} S_{\lambda}^C r_{\lambda}^{\Delta PT} d\lambda}, \quad (5)$$

где $r_{\lambda}^{\Delta PT}$ — спектральное распределение потока излучения ртутной лампы, отн. ед.;

$S_{\lambda i}^C$ — относительная спектральная характеристика чувствительности идеальной РГ;

S_{λ}^C — относительная спектральная характеристика чувствительности реальной РГ.

Относительная спектральная характеристика чувствительности идеальной РГ имеет вид: $S_{\lambda i}^C = 1$ — в рабочем диапазоне, $S_{\lambda i}^C = 0$ — вне диапазона.

Если показания УФ-радиометра отличаются от расчетной величины энергетической освещенности, то при помощи юстировочных приспособлений прибора на табло радиометра устанавливается рассчитанное значение освещенности в пределах $\pm 5\%$.

Аналогично производится калибровка УФ-радиометра с насадками 280-320 и 320-400, при этом поочередно устанавливаются интерференционные фильтры с длинами волн $\lambda_2 = \lambda_{\max}^B$ и $\lambda_3 = \lambda_{\max}^A$, а переключатель выбора спектрального диапазона — соответственно в положение «В» и «А».

Основная относительная погрешность калибровки УФ-радиометра не выходит за пределы $\pm 10\%$.

Выводы

1. В процессе разработки методики калибровки УФ-радиометра были определены наиболее весомые факторы, влияющие на метрологические характеристики радиометра при его калибровке и эксплуатации. Результаты исследований могут быть полезны при разработке новых радиометров.

Разработаны методики определения коэффициентов отличия формы относительной спектральной характеристики чувствительности реальной радиометрической головки от формы спектральной характеристики идеальной (теоретической).

2. Введением коэффициентов расширяется область применения УФ-радиометров.

3. Разработаны методики калибровки УФ-радиометров энергетической освещенности, улучшающие метрологические характеристики данного класса приборов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. ДСТУ 3193—95. Метрологія. Державна повірна схема для засобів вимірювань енергетичної освітленості некогерентним випромінюванням.
2. ГОСТ 8.195—89. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений ... энергетической освещенности в диапазоне длин волн 0,2—25,0 мкм.
3. Гигиеническая оценка и методы контроля оптического излучения производственных источников. (Методические рекомендации). — Киев: Министерство здравоохранения УССР, 1986.
4. Санітарні норми та правила устрою, експлуатації та контролю обладнання, яке генерує електромагнітне випромінювання оптичного діапазону (інфрачервоне, видиме, ультрафіолетове). — Київ: АМН України, 1997.
5. Шабашкевич Б. Г., Назаренко Л. А., Годованюк В. М. та ін. Дослідження параметрів приймачів, чутливих в УФ-діапазоні // Український метрологічний журнал. — 2004. — Вип. 1. — С. 33—36.
6. Каталог цветного стекла. — М.: Машиностроение, 1967.
7. www.tka.spb.ru
8. www.octava.info

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2007 г.

Техническая политика

Сценарии организации цифровых трактов для ВЧ-связи по высоковольтным линиям электропередачи. *Курицын Е. М., Пантелеев В. В.*

1

Выполнение программы развития в Украине техники и технологий сверхвысоких частот. *Луговский В. В., Николаенко Ю. Е., Ларкин С. Ю.*

2

Опыт разработки синтезаторов частот для современных радиолокационных систем. *Хитровский В. А., Бугай В. М., Сидько В. И.*

2

Проблемы и задачи развития технологий микроэлектроники в Украине. *Перевертайло В. Л.*

2

Состояние и тенденции развития волноводных излучателей на основе соединений A^3B^5 . *Каримов А. В.*

3

Проблемы применения аппаратурных средств для экологического мониторинга техногенных электромагнитных полей. *Грудзинский Э. М., Дуб П. Б., Ничога В. А., Самсонюк О. В.*

4

Еще раз о развитии солнечной энергетики и рынке кремниевого сырья в 2007—2010 гг. *Наумов А. В.*

4

Электронные средства: исследования, разработки

Эволюционное моделирование как метод решения задач оптимального проектирования несущих конструкций РЭС. *Бырка Р. В.*

1

Моделирование зонда с запирающим потенциалом в проектировании устройств телеметрии и управления. *Николаенко В. М., Николаенко О. В., Венедиктов А. Ю.*

1

Тестер терапевта. *Скубилин М. Д.*

1

Проектирование сумматоров в среде Active-HDL с предварительным анализом характеристик. *Паулин О. Н., Шапо Ф. С., Синегуб Н. И., Полещук С. О.*

3

Проектирование реконфигурируемых систем на ПЛИС. *Палагин А. В., Опанасенко В. Н., Лисовый А. Н.*

3

Многоканальное высокоточное устройство управления нейронным. *Костенко В. Л., Жаровцев С. О.*

3

Распознавание зрительных образов на основе топологической обработки информации. *Демехин В. В., Данилов В. В.*

3

Коррекция оптических эффектов близости при проектировании микросхем. *Родионов И. А., Макаручук В. В.*

3

Трехкоординатный пьезокерамический сканер на биморфных пьезо-элементах для зондового наномикроскопа. *Шарапов В. М., Гуржий А. Н., Филимонов С. А.*

4

Электронные приборы на основе полуизоляторов. *Стафеев В. И.*

5

Датчики ускорений и силы инерции и тяготения. *Голуб В. С.*

5

Экспериментальное исследование двойной дифракции электромагнитной волны на облучаемом объекте. *Володин И. А., Косякин В. Н., Сергеев В. И., Фёдорова З. Н., Чаплыгин А. А., Чигарев Б. Н.*

5

Тонкопленочные элементы кремниевых диодов Шоттки для высокотемпературного микромонтажа. *Баранов В. В., Соловьев Я. А., Кошкар Г. В.*

5

Расчет электромагнитного поля в электронных модулях с использованием интеграла Зоммерфельда. *Конников И. А.*

5

Прогнозирование напряжения отсечки ионно-имплантированных полевых транзисторов с барьером Шоттки на GaAs. *Горев Н. Б., Коджеспирова И. Ф., Привалов Е. Н.*

6

Методы формирования заданных коммутационных состояний сложных многоканальных систем и сетей. *Николаенко В. М., Березовский С. А., Николаенко О. В.*

6

Техника сверхвысоких частот

Входное устройство для РЛС с защитой от мощного сигнала. *Яковлев И. В., Демьяненко Ю. А., Санкин В. А., Чижма Н. М.*

1

Когерентный приемопередатчик Ка-диапазона для мобильных РЛС среднего радиуса действия. *Хитровский В. А., Бугай В. М., Коржик О. А.*

2

Транзисторные антенны-автогенераторы СВЧ-диапазона. *Прудис И. Н., Голинский В. Д., Сторож В. Г.*

2

Распространение СВЧ ультразвуковых объемных волн в устройствах на кристаллах ниобата лития. *Винник Д. М., Вороняк Т. И.*

2

Волноводно-микрополосковый переход 8-миллиметрового диапазона длин волн. *Яковлев И. В.*

2

Волноводный делитель 10-миллиметрового диапазона длин волн с развязанными выходами. *Яковлев И. В., Демьяненко Ю. А.*

2

Особенности расчета дискретных СВЧ-фазовращателей с переключаемыми каналами. *Оборжицкий В. И., Гонтар В. Д.*

2

Диоды Ганна из GaAs с катодным контактом, инжектирующим горячие электроны. *Иванов В. Н., Ковтонюк В. М., Николаенко Ю. Е.*

2

Полупроводниковый генератор миллиметрового диапазона на запердечном волноводе. *Плаксин С. В., Погорелая Л. М., Соколовский И. И., Лукаш В. С.*

2

Унифицированный возбудитель-синтезатор частот для комплексов постановки прицельных помех радиосвязи. *Хитровский В. А., Бугай В. М., Шульга О. В., Сахарин В. Г., Софиюк А. А.*

2

Компенсация фазовой ошибки в излучателях СВЧ-волн с помощью импедансной структуры. *Карпенко А. А., Лепих Я. И.*

2

Применение генетического алгоритма в задачах допускового синтеза микрополосковых устройств. *Кришук В. Н., Карпуков Л. М., Шило Г. Н., Фарафонов А. Ю., Артюшенко Б. А.*

5

СВЧ-электроника — перспективы в космической энергетике. *Ванке В. А.*

6

Метод расчета многоканальных лучевых переключателей с согласующим отрезком на входе. *Оборжицкий В. И.*

Энергетическая электроника

Управление многофазным импульсным преобразователем постоянного напряжения с гранично-разрывным режимом функционирования. *Гунченко Ю. А.*

Магний-воздушный первичный источник тока. *Короленко С. Д., Макордей Ф. В., Коноваленко Л. Д., Барба И. Н., Короленко Л. И.*

Сенсоэлектроника

Моделирование энергетической зависимости чувствительности CdTe (CdZnTe) детекторов гамма-излучения. *Захарченко А. А., Наконечный Д. В., Шляхов И. Н., Рыбка А. В., Кутний В. Е., Хажмурдов М. А.*

«Электронный нос» на основе матрицы элементарных полупроводниковых резистивных сенсоров. *Алтухов А. А., Митягин А. Ю., Шустров А. В.*

Оптический датчик температуры на основе нанокристаллической пленки SiC. *Лопин А. В., Семёнов А. В., Пузилов В. М.*

Поверхностно-барьерные структуры для ультрафиолетовых сенсоров пламени. *Бобренко Ю. Н., Шереметова Г. И., Семикина Т. В., Ярошенко Н. В.*

Расчет коэффициента преобразования кондуктометрического датчика биосенсора. *Михаль А. А., Рубанчук М. П.*

Первичные преобразователи давления криогенных жидкостей. *Дружинин А. А., Марьямова И. И., Кутраков А. П., Павловский И. В.*

Функциональная микро- и нанoeлектроника

Воздействие импульсов прямого тока на время жизни неосновных носителей заряда в p^+-n -диоде. *Кушниренко В. В., Нинидзе Г. К., Павлюк С. П., Савицкий С. М., Третьяк О. В.*

Зависимость сопротивления металлических квантовых проводов от температуры. *Обухов И. А.*

Анизотропная термоэлектрическая матрица для регистрации излучения. *Ащеулов А. А.*

Новые возможности фотоэлектрического метода определения высоты барьера в структурах Au- n -GaAs. *Мелебаев Д., Мелебаева Г. Д., Рудь Ю. В., Рудь В. Ю.*

Методика определения эффективной площади фоточувствительного элемента фотодиода. *Бутенко В. К., Докторович И. В., Годованюк В. Н., Рюхтин В. В., Юрьев В. Г.*

Поверхностные нанoобразования при окислении слоистых кристаллов SnS₂. *Катеринчук В. Н., Ковалюк М. З., Литвин О. С.*

Формирование прозрачных омических контактов к p -GaN для светоизлучающих диодов. *Босый В. И., Данилов Н. Г., Кохан В. П., Новицкий В. А., Семашко Е. М., Ткаченко В. В., Шпоняк Т. А.*

Особенности фотоэлектрических характеристик фотоэлектрoпреобразовательных структур. *Кари-*

мов А. В., Ёдгорова Д. М., Гиясова Ф. А., Азимов Т. М., Бузруков У. М., Якубов А. А.

Алмазные фотоприемники ультрафиолетового диапазона. *Алтухов А. А., Митягин А. Ю., Горохов Е. В., Фещенко В. С., Талипов Н. Х.*

Структура Te-CdTe со свойством электронного переключения с памятью. *Байдуллаева А., Борщ В. В., Велещук В. П., Власенко А. И., Даулетмуратов Б. К., Левицкий С. Н., Мозоль П. Е.*

Гетеропереход на основе кристалла FeIn₂Se₄, полученного методом Бриджмена. *Ковалюк З. Д., Катеринчук В. Н., Нетяга В. В., Заслонкин А. В.*

Изменение сопротивления силовых диодов под действием импульсов ударного тока. *Павлюк С. П., Савицкий С. М., Солтис Р. Б., Тищенко И. Ю.*

Обеспечение тепловых режимов

Эффективное охлаждение мощного сверхвысоко-частотного микрoэлектронного блока. *Батуркин В. М., Николаенко Ю. Е., Галяутдинов Д. М., Владимиров И. Т.*

Использование адиабатического размагничивания парамагнитного вещества в конденсаторе тепловой трубы. *Механцев Е. Б., Замков Е. Т., Палий А. В.*

Исследование процессов теплообмена в коллекторных термосифонах коммутационных плат высокой степени интеграции. *Николаенко Ю. Е., Цыганский А. А.*

Бесконтактный тепловой контроль электронно-вычислительных средств. *Панфилова С. П., Власов А. И., Гриднев В. Н., Червинский А. С.*

Технологические процессы и оборудование

Получение поверхностно-барьерных структур на основе четырехкомпонентных твердых растворов A⁴B⁶. *Ткачук А. И., Царенко О. Н., Рябец С. И., Ткачук И. Ю., Ковалёв Ю. Г.*

Технологии изготовления фотонных кристаллов. *Березянский Б. М.*

Повышение качества изделий электронной техники путем моделирования стадий их производства. *Шестакова Т. В.*

Комбинированный способ выращивания эпитаксиальных слоев полупроводниковых соединений A³B⁵. *Ёдгорова Д. М., Каримов А. В., Гиясова Ф. А., Саидова Р. А.*

Автоматизированный спектрометр глубоких уровней для исследования полупроводниковых структур. *Бойко Ю. В., Кузнецов Г. В., Савицкий С. М., Третьяк О. В.*

Позиционирование изображений фотошаблонов в системах автоматизированного оптического контроля. *Крылов В. Н., Щербакова Г. Ю., Козина Ю. Ю.*

Моделирование технологии изготовления субмикронных КМОП СБИС с помощью систем TCAD. *Глушко А. А., Родионов И. А., Макаручук В. В.*

Установка для экспресс-контроля глубины охлаждения термоэлектрических микромодулей Пельтье. *Ащеулов А. А., Величук Д. Д., Романюк И. С.*

Вычисление дифракционной составляющей глубины резко изображаемого пространства в оптическом микроскопе. *Боровицкий В. Н.*

Сравнительный анализ технологий изготовления кремниевых схем считывания информации с ИК-фотодиодов. *Рева В. П., Коринец С. В., Писаренко Л. А., Духнин С. Е., Барсукова Н. А.*

Технология изготовления автоэмиссионных кремниевых катодов субмикронных размеров. *Дружинин А. А., Голота В. И., Козут И. Т.*

Направленная кристаллизация силицидных пленок на кремниевой подложке. *Белоусов И. В.*

Ультразвуковая очистка оптико-механических систем. *Томаль В. С.*

Формирование наноструктурированных пленок иридия и поликластерного алмаза. *Беянин А. Ф., Паль А. Ф., Самойлович М. И., Суетин Н. В., Дзбановский Н. Н., Митин В. С., Пащенко П. В., Тимофеев М. А.*

Оптимизация распределения концентрации носителей по толщине эпитаксиальных слоев. *Каримов А. В., Ёдгоровая Д. М., Саидова Р. А., Гиясова Ф. А., Хайдаров Ш. А.*

Материалы электроники

Модель для определения интегрального показателя качества экранирующих радиоматериалов. *Демьянчук Б. А.*

Свойства эпитаксиальных слоев GaAs, легированных редкоземельными элементами. *Круковский С. И., Сыворотка Н. Я.*

Применение бесвинцового стекла в толстопленочных терморезистивных материалах. *Вакив Н. М., Гадзаман И. В., Мруз О. Я., Немеш В. Г.*

Устройство для бесконтактного измерения электропроводности полупроводников. *Ащеулов А. А., Бучковский И. А., Романюк И. С.*

Строение и высокотемпературная сверхпроводимость пленок $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$. *Самойлович М. И., Беянин А. Ф., Илюшечкин А. Ю.*

Синтез ферромагнитных оксидов — наполнителей радиоматериалов. *Демьянчук Б. А., Полищук В. Е.*

Метрология. Стандартизация

Опыт применения европейского стандарта PSS-49 при разработке тепловых труб для терморегулирования микроспутника Bird. *Батуркин В. М.*

Пять начальных шагов к внедрению стандарта ISO-9001. *Рудковский В. Н., Пик В. Н.*

Оформление конструкторской документации на печатные платы в условиях автоматизированного проектирования и подготовки производства. *Ефименко А. А., Васильева Л. П., Ткаченко О. Р.*

Метрологические характеристики яркомера "Тензор-28". *Фодчук И. М., Докторович И. В., Годованюк В. Н., Бутенко В. К., Юрьев В. Г.*

К истории науки и техники

Школа А. Ф. Иоффе как пример единства науки, образования и производства. *Усанов Д. А.*

Библиография

Указатель статей, опубликованных в 2006 г.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Кечиев Л. Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. — М.: Группа ИДТ, 2007. — 616 с.

Впервые в отечественной литературе рассматривается полный комплекс вопросов проектирования печатных плат для быстродействующей цифровой аппаратуры. Дается характеристика современной и перспективной элементной базы, рассматриваются электрофизические параметры печатных плат и линий передач в их составе. Большое внимание уделено методам анализа помех в цифровых узлах. Отдельно рассмотрен один из важнейших вопросов — проектирование шин питания и заземления в составе плат. Детально представлен материал по проектированию дифференциальных пар, которые все шире применяются в печатных платах. Излучения от печатных плат и их восприимчивость к электромагнитным помехам рассмотрены в контексте электромагнитной совместимости, базовые сведения о которой необходимы каждому разработчику. В завершение рассматриваются некоторые аспекты САПР печатных плат, применение которых важно для создания быстродействующих печатных узлов, а также влияние технологии на конечные показатели плат.

Изложение материала ориентировано на инженерную аудиторию, иллюстрируется многочисленными практическими примерами и сопровождается конкретными рекомендациями и правилами проектирования.

Книгу можно рассматривать как развернутый справочник. Она может быть полезна разработчикам печатных плат, студентам и аспирантам соответствующих специальностей, а также её можно рекомендовать в качестве учебного пособия в системе повышения квалификации и профессионального мастерства.

Издание книги одобрено Гильдией профессиональных технологов приборостроения.

ПАМЯТКА АВТОРУ ЖУРНАЛА «ТКЭА»

1. Рукопись должна соответствовать тематике журнала и отличаться прикладной направленностью.

Если результаты получены в смежных областях знаний, необходимо показать их применимость в области интересов журнала.

2. При оценке рукописи редакцию будут интересовать следующие аспекты:

- актуальность темы;
- обоснованность постановки задачи;
- новизна информации (в сравнении с работами предшественников);
- убедительность доказательств;
- правомерность выводов;
- возможность практического применения;
- целесообразность (и адекватность тексту) таблиц, иллюстраций, списка использованных источников;

- строгость терминологии;

- композиция рукописи, в том числе оправданность объема.

3. Название рукописи должно быть конкретным и, в то же время, по возможности кратким.

4. Приведите мини-аннотацию до 20 слов, отображающую важнейший результат статьи.

5. Обозначьте разделы рукописи. Выделите выводы (резюме, заключение). Кстати, проверьте себя — насколько согласуются поставленная задача, выводы и название статьи.

6. Единицы измерения всех величин должны отвечать современным требованиям, а использованные символы (и аббревиатуры) должны быть пояснены при первом их употреблении в тексте.

7. При ссылке в тексте на численные значения, формулы и иные фактические данные, заимствованные из книг, следует (для удобства поиска) указывать не только саму книгу, но и страницу (например [2, с. 418]).

8. Список «Использованные источники» формируется в порядке их упоминания в тексте. Желательно избегать ссылок на труднодоступные источники (например на материалы конференций) или на недолговечные (например Интернет). Принятое в журнале описание источников показано на сайте www.tkea.com.ua.

9. Сопроводите рукопись библиографической карточкой на русском и английском языках с аннотацией до 500 печ. знаков. Укажите ключевые слова, а также индекс рукописи по Универсальной десятичной классификации (УДК).

10. Материалы статьи направляйте по e-mail <tkea@optima.com.ua> (размер письма не должен превышать 1 Мб). Если Вы направляете рукопись по почте, приложите записку статьи на CD.

Текст статьи набирается в текстовом редакторе Microsoft Word размером 12, без переносов, с интервалом не менее 1,5. Все слова внутри абзаца разделяются только одним пробелом. Правый край текста выравнивать не обязательно. Использование программы Equation допускается только в случаях, когда Word бессилен.

С точки зрения удобства проведения наборных работ желательно, чтобы объем иллюстраций не превышал 40% общего объема статьи. Иллюстрации должны быть представлены отдельными файлами. Графики и чертежи следует выполнять в черно-белом (битовом) режиме.

Если рисунки выполнялись в программе CorelDraw или Word, то необходимо представить оригинальные файлы (*.cdr или *.doc). Рисунки, созданные в других программных пакетах, необходимо экспортировать в любой из следующих форматов: PCX, JPG, TIF.

В случае когда автор не может обеспечить высокое качество рисунка в машинном виде, допускается его выполнение вручную с дальнейшим сканированием в битовом режиме с разрешением 300 dpi.

При подготовке цветных иллюстраций желательно фотографировать объекты на однотонном фоне цифровой камерой. Если проводится сканирование изображений, то его необходимо выполнять с разрешением 300 dpi.

11. Снабдите рукопись сведениями об авторах (фамилия, имя, отчество, ученая степень, место работы, должностное положение, дата рождения, служебный и домашний адреса с указанием почтового индекса, e-mail, телефон, телефакс).

12. Если считаете необходимым, сопроводите статью экспертным заключением о возможности ее публикации в открытой печати.

11-13 марта
2008



ФОТОНИКА



Мир лазеров и оптики

3-я международная специализированная выставка оптической, лазерной и оптоэлектронной техники

www.photonics-expo.ru

Место проведения:
Россия, Москва,
ЦВК «Экспоцентр»

Организаторы:



ЭКСПОЦЕНТР



ЛАЗЕРНАЯ АССОЦИАЦИЯ