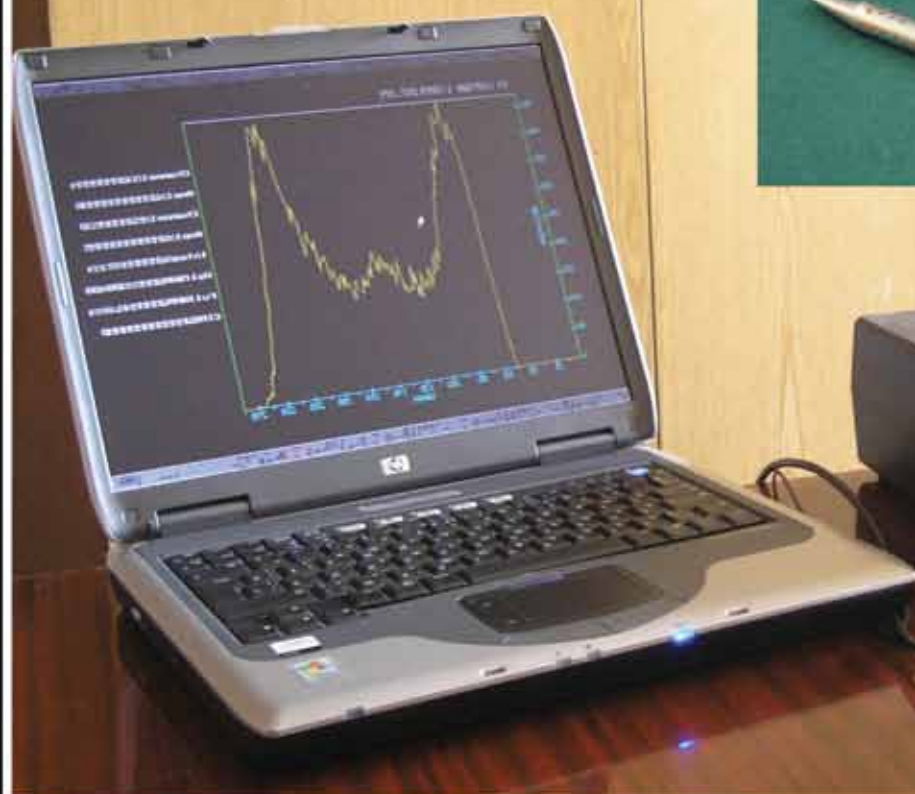


ТРА

ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ

К статье
«Сенсоры на основе CdZnTe
для измерений
рентгеновского излучения»



2(62) 2006

МАРТ — АПРЕЛЬ



7-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

22—26 мая 2006 года
Украина, г. Одесса

- ◆ Прогрессивные информационные технологии и системы искусственного интеллекта
- ◆ Информационные технологии. Компьютерные системы и сети
- ◆ Радиотехнические, телекоммуникационные и телевизионные системы
- ◆ Проблемы экологического мониторинга и медицинской диагностики

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

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

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

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

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ



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

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

Редакция: Е. А. Тихонова, А. А. Ефименко, Л. М. Лейдерман,
М. С. Назарова, А. Н. Ощепенко.
Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корецкая.
Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.

Журнал издается при поддержке
Министерства промышленной
политики Украины,
НПП «Сатурн»,
ЗАО «Украинлит»,
Компани «Сатурн Дейта
Интернешнл»
(г. Киев),
НПП «Карат» (г. Львов),
СКБ «Молния»,
Политехнического университета
(г. Одесса),
ЦКБ «Ритм» (г. Черновцы)

Подписано к печати 14.04 2006 г. Формат 60×84 1/8.
Печать офсетная. Печ. л. 8,0. Уч.-изд. л. 9,9. Тираж 500 экз. Заказ № 44.
Издательство «Нептун-Технология»
(65005, г. Одесса, ул. Прохоровская, 45).
Отпечатано в типографии издательства «ТЭС»
(65012, г. Одесса, ул. Канатная, 81/2).

ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ

2006 № 2 (62)

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

Год издания 30-й

Год регистрации 1992

Регистрационный номер

КВ 2092 от 07.06.96 г.

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

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К.т.н. В. М. Чмиль

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

К.т.н. Н. М. Вакив

Д.т.н. В. Н. Годованюк

К.т.н. А. А. Дашковский

Д.т.н. Л. С. Лутченков

Д.т.н. В. П. Малахов

Д.ф.-м.н. В. Ф. Мачулин

В. А. Мингалёв

Е. А. Тихонова

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д.т.н. А. А. Ащеулов

Д.т.н. В. В. Баранов

Д.ф.-м.н. А. Е. Беляев,

зам. гл. редактора

К.т.н. Э. Н. Глушеченко,

зам. гл. редактора

Д.т.н. В. Т. Дейнега

Д.ф.-м.н. В. А. Дроздов

К.т.н. И. Н. Еримичой,

зам. гл. редактора

К.т.н. А. А. Ефименко,

ответственный секретарь

Д.ф.-м.н. Г. П. Ковтун

Л. М. Лейдерман

Д.т.н. С. Ю. Лузин

К.т.н. И. Л. Михеева

К.т.н. Ю. Е. Николаенко

Д.ф.-м.н. В. В. Новиков

К.т.н. В. В. Рюхтин

Д.ф.-м.н. П. В. Сербя

Д.ф.-м.н. О. И. Шпотьок

УЧРЕДИТЕЛИ

Институт физики полупроводников

им. В. Е. Лашкарева,

Научно-производственное

предприятие «Сатурн»,

Одесский национальный

политехнический университет,

Редакция журнала «ТКЭА»

Техническая политика

Использование сети электропитания для построения информационных систем. *А. И. Семенко, А. П. Юрчук* 3

Техника сверхвысоких частот

Конструктивно-технологические особенности автодинных ГИС КВЧ на диодах Ганна. *С. Д. Воторопин* 7

Статистические характеристики интенсивности мешающих сигналов в безэховой камере туннельного типа. *Б. А. Демьянчук* 14

Вопросы приборостроения

Оптимизация аппаратно-программного обеспечения для автоматизации спектрофотометра СФ-20. *А. И. Воробец, Г. И. Воробец, С. В. Мельничук* 19

Сенсоэлектроника

Сенсоры на основе CdZnTe для измерений рентгеновского излучения. *А. В. Рыбка, А. А. Захарченко, Л. Н. Давыдов, И. Н. Шляхов, А. А. Бликин, К. В. Кутный* 23

Функциональная микро- и нанозлектроника

Комплексно-легированные эпитаксиальные структуры InP/InGaAsP для оптоэлектроники. *С. И. Круковский* 27

Исследование фотоэлектрических характеристик микрофототерминала. *А. В. Каримов, Д. М. Ёдгорова, У. М. Бузруков, М. А. Мирджелилова, Ш. Ш. Болтаева* 32

Минимизация погрешности интегрального преобразователя давления с разделительной мембраной. *Г. Г. Бабичев, Э. А. Зигченко, С. И. Козловский, В. В. Недоступ, В. А. Романов, Н. Н. Шаран* 36

Анизотропные термоэлектрические координатно-чувствительные линейки. *А. А. Ащеулов, И. В. Гуцул* 39

Фотоэлектрические параметры гетеропереходов $\text{SnS}_{2-x}\text{Se}_x\text{-InSe}$ ($0 \leq x \leq 1$). *В. Н. Катеринчук, М. З. Ковалюк* 41

Обеспечение тепловых режимов

Моделирование тепловых режимов активных компонентов электронных модулей. *И. С. Кондрашенко* 43

Технологические процессы и оборудование

Поверхностный монтаж мощных бескорпусных MOSFET-транзисторов. *Д. Л. Ануфриев, И. И. Рубцевич, А. Ф. Керенцев* 45

Измерение толщины покрытий в процессе их нанесения с помощью емкостного датчика. *А. С. Истамин, Э. И. Семенов* 49

Влияние плазмохимического травления на структуру поверхности кремниевых пластин фотоэлектрических преобразователей. *Б. П. Полозов, О. А. Федорович, В. Н. Голоток, А. А. Мариненко, Д. В. Лукамский* 52

Материалы электроники

Определение электропроводности нанокompозитов с хаотической структурой. *В. В. Новиков, Н. О. Дмитриева, А. В. Новиков* 56

Получение алюмомагнетитовой керамики с улучшенными влаговлаживательными характеристиками. *И. Б. Винник, И. В. Гадзаман, Г. И. Клым, О. Я. Мруз, О. И. Шпотьок* 60

Особенности топологии поверхности слоистых кристаллов In_4Se_3 . *А. А. Балицкий* 63

Библиография

Новые книги 22, 31, 38, 48, 55

В портфеле редакции 22, 31

Выставки. Конференции 13, 26

ЗМІСТ

Технічна політика

Використання мережі електроживлення для побудови інформаційних систем. *Семенко А. І., Юрчук А. П.* (3)

Техніка надвисоких частот

Конструктивно-технологічні особливості автодинних ПС КВЧ на діодах Гана. *Воторопін С. Д.* (7)

Статистичні характеристики інтенсивності заважаючих сигналів в безеховій камері тунельного типу. *Дем'янюк Б. О.* (14)

Питання приладобудування

Оптимізація апаратно-програмного забезпечення для автоматизації спектрофотометра СФ-20. *Воробець О. І., Воробець Г. І., Мельничук С. В.* (19)

Сенсоелектроніка

Сенсори на основі CdZnTe для вимірювань рентгеновського випромінювання. *Рибка О. В., Захарченко О. О., Давидов Л. М., Шляхов І. М., Блінкін А. А., Кутній К. В.* (23)

Функціональна мікро- та наноелектроніка

Комплексно-леговані епітаксійні структури InP/InGaAsP для оптоелектроніки. *Круковський С. І.* (27)

Дослідження фотоелектричних характеристик мікрофототерміналу. *Каримов А. В., Йодгорова Д. М., Бузруков У. М., Мірджалілова М. А., Болтаєва Ш. Ш.* (32)

Мінімізація похибки інтегрального перетворювача тиску з розділовою мембраною. *Бабічев Г. Г., Зінченко Е. О., Козловський С. І., Недоступ В. В., Романов В. О., Шаран М. М.* (36)

Анізотропні термоелектричні координатно-чутливі лінійки. *Ащеулов А. А., Гуцул І. В.* (39)

Фотоелектричні параметри гетеропереходів SnS₂-Se_x-InSe (0 ≤ x ≤ 1). *Катеринчук В. М., Ковалюк М. З.* (41)

Забезпечення теплових режимів

Моделювання теплових режимів активних компонентів електронних модулів. *Кондрашенков І. С.* (43)

Технологічні процеси та обладнання

Поверхневий монтаж потужних безкорпусних MOSFET-транзисторів. *Ануфрієв Д. Л., Рубцевіч І. І., Керентцев А. Ф.* (45)

Вимірювання товщини покриттів в процесі їх нанесення за допомогою емсійного датчика. *Істомін О. С., Семенов Е. І.* (49)

Вплив плазмохімічного травлення на структуру поверхні кремнієвих пластин фотоелектричних перетворювачів. *Полозов Б. П., Федорович О. А., Голотюк В. Н., Маріненко А. А., Луканський Д. В.* (52)

Матеріали електроніки

Визначення електропровідності нанокompatів з хаотичною структурою. *Новіков В. В., Дмитрієва Н. О., Новіков А. В.* (56)

Отримання алюмомагнієвої кераміки з поліпшеними вологочутливими характеристиками. *Вінник І. Б., Гадзаман І. В., Клим Г. І., Мруз О. Я., Шпотьок О. Й.* (60)

Особливості топології поверхні шаруватих кристалів In₄Se₃. *Балицький О. О.* (63)

CONTENT

Technical polytic

The use of network of power supply for construction of the informative systems. *Semenko A. I., Yurchuk A. P.* (3)

Microwave engineering

Constructively technological features of HIC for millimeter autodyne on Gunn diodes. *Votoropin S. D.* (7)

Statistical description of the intensity of the preventing signals in the unreflecting chamber of tunnel type. *Demjanjuk B. A.* (14)

The questions of instrument making

Optimization of the apparatus-programming software for automation of the SF-20 spectrophotometer. *Vorobets O. I., Vorobets G. I., Melnychuk S. V.* (19)

Sensoelectronics.

CdZnTe sensors for X-ray measurements. *Rybka A. V., Zakharchenko A. A., Davydov L. N., Shlyakhov I. N., Blinkin A. A., Kutny K. V.* (23)

The functional micro- and nanoelectronics Complex-doping epitaxial structures InP/InGaAsP for optoelectronic. *Krakovskiy S. I.* (27)

Research of the photo-electric characteristics microphototerminal. *Karimov A. V., Yodgorova D. M., Buzrukov U. M., Mirdjalilova M. A., Boltaeva Sh. Sh.* (32)

Minimization of measurement error of integrated pressure sensor with media separating diaphragm. *Babichev G. G., Zinchenko E. A., Kozlovskiy S. I., Nedostup V. V., Romanov V. A., Sharan N. N.* (36)

Anisotropic thermoelectric coordinate-sensitive rules. *Ascheulov A. A., Gutsul I. V.* (39)

Photoelectrical parameters of SnS₂-Se_x-InSe heterojunctions (0 ≤ x ≤ 1). *Katerinchuk V. N., Kovalyuk M. Z.* (41)

Ensuring of thermal modes

Modelling the thermal conditions of active components of electronics modules. *Kondrashenkov I. S.* (43)

Technological processes and development

Surface mounting of unpackaged power MOSFET. *Anufriyev D. L., Rubtsevich I. I., Kerentsev A. F.* (45)

The control of thickness of drawing coverings by capacitor gauge. *Istomin A. S., Semenov E. I.* (49)

Influence of the plasma chemical etching on the silicon plates surface of photo electric converters. *Polozov B. P., Fedorovich O. A., Golotjuk V. N., Marinenko A. L., Lukomskiy D. V.* (52)

Materials of electronics

Definition of electrical conductivity nanocomposites with random structure. *Novikov V. V., Dmitrieva N. O., Novikov A. V.* (56)

Obtaining of magnesium aluminate ceramics with the improved humidity sensitivity characteristics. *Vynnyk I. B., Hadzaman I. V., Klym H. I., Mruz O. Ya., Shpotyuk O. I.* (60)

Peculiarities of surface topology of In₄Se₃ layered crystals. *Balitskii O. A.* (63)

Если этот год — 30-й год издания журнала "ТКЭА", то 1991 год был годом его регистрации как нового СМИ СССР. Тот же 1991 год — год разделения СССР на отдельные самостоятельные государства. Промышленные предприятия союзно-республиканских министерств продолжают управляться из столиц бывших союзных республик, а предприятия союзных министерств, в том числе МЭП, МРП, МПСС и других оборонных отраслей промышленности, теряют системное управление. В режиме свободного падения и журнал "ТКЭА". Зачастой в 1991-м, он должен был появиться на свет в 1992-м, но без повивальной бабки был обречен на смерть при родах.

Информационная составляющая — главная особенность современного мира. С этим никто не спорит, но не все готовы подкрепить этот тезис конкретным делом, решением, поступком. Вместе с тем имевшие разное отношение к журналу В. Г. Лукомский, А. В. Оверчук, В. Б. Штimmerман, Т. В. Зуб сумели тогда сделать все возможное, чтобы организовать начальное финансирование журнала в новых условиях. Второе рождение журнала состоялось. Заявленные номера вышли в свет и поступили подписчикам. В отличие от своего предшественника — отраслевого сборника, журнал сверстался в двухколонном наборе. Цветную обложку для него разработал конструктор-дизайнер одесского завода "Кинап" Б. Ф. Конол.

Новый 1993 год — новое безденежье. И пока решается вопрос о возрождении государственной поддержки отраслевого издания, журналу бросают спасательный круг начальники структурных подразделений одесского НИТИ "Темп" В. И. Попов и В. Д. Лемза. Первый год жизни журнала не стал последним...

Названные выше имена не всем известны, и это естественно. За каждым делом стоят не всем известные люди, множество обязанностей или в силу личной позиции — обеспечивают успех этого дела. И если, дорогой Читатель, Вы можете подписаться на журнал "ТКЭА", то это потому, что жизнь ему дают не только авторы, не только редакция, но и множество не всем известных людей. Спасибо им!

Д. т. н. А. И. СЕМЕНКО, А. П. ЮРЧУК

Украина, г. Киев, Гос. университет информационно-коммуникационных технологий
E-mail: setel@nbi.com.ua

Дата поступления в редакцию
19.12.2005 г.

Оппонент О. П. БАСЮК
(ОАО "Нептун", г. Одесса)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕТИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Приведен обзор состояния и перспектив создания информационных систем на основе сети электропитания. Показана возможность достижения скорости передачи данных до 45 Мбит/с.

Решение стратегической задачи построения информационного общества связано с созданием мультисервисных сетей, способных предоставлять пользователю любые информационные услуги в любом месте и в любое время. Вместе с тем если в городах идет интенсивное развитие телекоммуникационных сетей на основе волоконно-оптических линий связи с внедрением цифровых технологий, а также сетей мобильной связи, то в ряде сельских населенных пунктов отсутствует даже телефонная связь. Основной причиной такого состояния является сложность финансирования проектов сельской телекоммуникации, в том числе из-за их низкой рентабельности вследствие слабого экономического развития сельских регионов.

Известно, что основные затраты при построении телекоммуникационных систем связаны с созданием кабельной сети. В то же время в любом населенном пункте существует сеть электропитания, которую можно использовать для создания сельских телекоммуникационных сетей.

В настоящее время телефонные линии, послужившие основной информационной средой для сети Internet, уже исчерпывают свои возможности для дальнейшего развития Глобальной сети. Остро встал вопрос об использовании новой информационной среды для передачи информации. Возникшая ситуация заставила специалистов обратить внимание на готовые каналы, которые приходят в каждый дом, — линии электропитания, имеющие практически полностью неиспользованные информационные ресурсы.

Первые исследования и разработки в части использования проводов электропитания для информационных целей привели к внедрению низкоскоростных информационных систем управления и контроля в высоковольтных линиях электропередачи (ЛЭП) [1, 2]. Дальнейшие исследования в поисках новой информационной среды привели к попытке использования сетей электропитания 110/220 В, 50 Гц для создания локальных информационных систем в пределах зоны обслуживания трансформаторной подстанции [3—11].

Трудности решения данной задачи связаны со следующими особенностями сети электропитания.

1. Сеть представляет собой сложную древовидную структуру с нестационарной нагрузкой вследствие случайных подключений электроприборов. По этой причине нагрузочная характеристика сети является случайной величиной, что требует особого подхода при согласовании подключаемых к сети устройств.

2. Подключения и отключения электроприборов создают в сети интенсивные помехи широкого спектра. Кроме того, электропроводка является эффективной антенной для приема внешних электромагнитных излучений. Эти причины вызывают необходимость принятия специальных мер для обеспечения помехоустойчивости создаваемых информационных систем.

3. Сеть электропитания выполнена в основном алюминиевым проводом (только в домах новой постройки используется медный провод), что предопределяет частотные искажения передаваемого сигнала. По этой причине электросеть имеет низкую пропускную способность и требует особого подхода для реализации максимально возможной скорости передачи информации на максимальное расстояние при многоканальном доступе к сети.

4. Электропитание потребителей осуществляется от 3-фазной сети с равномерным распределением нагрузки на каждую из двух фаз. По этой причине необходимо решать задачу межфазной передачи информации с минимальными потерями и искажениями.

Создание систем передачи данных по сетям электропитания PLC (Power Line Communication) получило развитие в известных электронных и компьютерных фирмах. Международная ассоциация International Powerline Forum рассматривает в качестве наиболее перспективных областей применения систем PLC следующие:

- системы дистанционного управления, контроля, учета, сигнализация;
- домашняя автоматика;
- локальные компьютерные сети для малых офисов и домашних офисов SOHO (Small Office/ Home/ Office);
- телефония;
- доступ к Internet.

К настоящему времени принят ряд государственных и международных стандартов, определяющих

ТЕХНИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА

Нормативные документы, определяющие условия использования сети электропитания для построения информационных систем

Нормативные документы	Содержание
МЭК 61.000-3-8 Международный стандарт	Распространяется на оборудование, предназначенное для передачи сигналов по низковольтным электросетям в полосе частот от 3 до 525 кГц. Устанавливает допустимые полосы частот, уровни сигналов и помех для регионов 1, 2, 3 (классификация UTU). В Европе (регион 1) радиовещание ведется на частотах от 148,5 кГц и выше, в то время как в регионах 2 и 3 — на частотах выше 525 кГц
МЭК 51.343-3-1 Международный стандарт	Распространяется на оборудование распределенных систем автоматики на базе линий электропитания. В том, что касается региона 1, ссылается на стандарт CENELEC EN 50065
Стандарт CENELEC EN 50065-1.1991	Распространяется на оборудование, предназначенное для передачи сигналов по низковольтным распределительным электросетям (220 В, 50 Гц), включая внешние кабели и внутреннюю электропроводку зданий. Разрешает использование полосы частот от 3 до 148,5 кГц для передачи данных по линиям электропитания. На более высоких частотах в Европе работают длинноволновые радиостанции. Частоты от 3 до 95 кГц используют только энергетические службы, от 95 до 148,5 кГц — потребители электроэнергии
Стандарт FCC 15.107 США, Канада	Распространяется на оборудование, предназначенное для передачи сигналов по низковольтным распределительным электросетям (120 В, 60 Гц). Устанавливает допустимые полосы частот, уровни сигнала, наводимого в сети. Разрешает передавать сигналы по линиям электропитания в полосе частот свыше 450 кГц и допустимом уровне вводимых сигналов — 250 мкВ
ГОСТ Р51317.3.8-99 (МЭК 61.000-3-8-97)	Содержит аутентичный текст стандарта МЭК 61.000-3-8-97. Определяет три полосы частот, разрешенных к использованию: от 3—9 кГц — для энергосберегающих компаний; от 9—95 кГц — для энергоснабжающих организаций и органов энергонадзора; от 95—148,5 кГц — для потребителей электроэнергии

частотный диапазон и уровень сигналов для информационных систем на основе сети электропитания (см. таблицу) [5]. По скорости передачи (C) системы разделяют на низкоскоростные — до 10 Кбит/с, работающие в полосе частот $\Delta f=3—525$ кГц, и высокоскоростные — свыше 1 Мбит/с, работающие в полосе частот $\Delta f=3—32$ МГц (см. рисунок).

Основные усилия исследователей и разработчиков были направлены на создание с использованием электропроводки локальных компьютерных сетей с подключением к Internet. При этом разрабатывались как технологии построения сетей, так и специальные модемы для подключения к сети электропитания.

Главным препятствием в достижении практических результатов являлись помехи в электросети от включения и выключения электроприборов. Приемлемого решения этой проблемы удалось достичь путем применения специальных методов модуляции и кодирования сигнала, в частности, применения метода частотного уплотнения с ортогональными несущими OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) и дифференциальной квадратурной фазовой манипуляции со сдвигом DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying), а также путем использования сложного широкополосного сигнала с кодовым разделением каналов типа стандарта мобильной связи CDMA (Code

Division Multiple Access) и линейного частотно-модулированного сигнала.

В основу архитектуры построения информационных систем с использованием электросетей была положена семиуровневая модель взаимодействия OSI (Open System Interconnection).

К настоящему времени уже разработаны и используются технологии передачи данных по сети электропитания со скоростями передач до 1 Мбит/с: X-10, CEBus, Lon Works, Adaptive Networks, DPL 1000.

Технология X-10 — одна из первых, в которой была применена амплитудно-частотная модуляция для передачи управляющей информации по сети электропитания. Технология нашла применение для управления бытовыми приборами.



Виды систем передачи информации через электросеть

Передача данных производится в моменты, когда значение напряжения равно нулю, т. е. минимально влияние различных устройств, подключенных к электросети, а также минимально значение шумов. Двоичному нулю соответствует отсутствие импульса, а двоичной единице — радиопульс на частоте 120 кГц в течение 1 мс. Скорость передачи информации по сети с напряжением 220 В и частотой 60 Гц составляет 60 бит/с [4, 12, 13].

Технология Lon Works была разработана корпорацией Echelon. Свое применение технология успешно нашла в системах жизнеобеспечения зданий, промышленной и домашней автоматике. Lon Works построена на открытом семиуровневом протоколе Lon Talk. В зависимости от используемого напряжения (24, 120, 220, 380, 480 В) с частотой переменного тока 50, 60, 400 Гц или постоянного тока используют несколько видов адаптеров, которые изготовлены в виде микросхем или микросборок. К разработкам в данном направлении активно подключились компании Microsoft, Cisco, Motorola, Toshiba [4, 12].

Компанией Adaptive Networks разработана микросхема, которая позволяет передавать данные по электропроводке со скоростью 19,2—100 Кбит/с. Разработки компании направлены не только на построение домашних сетей, но и на создание систем промышленного контроля и управления. При передаче данных была применена широкополосная модуляция с расширением спектра. Искажения сигнала, вызванные частотно-зависимым затуханием, удалось компенсировать при помощи схемы адаптивной компенсации. Компания выпускает три комплекта аппаратуры в различных вариантах исполнения: AN48 — 4,8 Кбит/с, AN19 — 19,2 Кбит/с, AN100 — 100 Кбит/с. AN48 использует полосу частот от 9 до 95 кГц, AN100 — соответственно до 450 кГц. Полная физическая скорость системы составляет 268 Кбит/с, а эффективная — 115 Кбит/с. Архитектура сети позволяет поддерживать адресацию до 65534 устройств [4, 12, 14].

Английская компания Nor. Web разработала технологию DPL-1000, которая позволяет передавать по сетям электропитания не только пакеты данных, но и голос. Она построена на запатентованных средствах защиты данных от наводок. В настоящее время на основе технологии DPL-1000 в Германии пользователи получили доступ к всемирной сети Internet со скоростью 1 Мбит/с в обоих направлениях, а в Великобритании к сети Internet подключена общеобразовательная школа [4, 13].

Разработанная компанией Intelogis технология Plug-In реализована в серии продуктов Passport. Для передачи данных применяется частотная модуляция. Частоты, которые используются для передачи логических нулей и единиц, находятся чуть выше обычного шума. Технология применяется в сетях напряжением 110 В. Скорость передачи данных на расстоянии 400 метров составляет 350 Кбит/с, в перспективе — 1 Мбит/с [4, 15, 16].

Международный альянс Home Plug Alliance, созданный по инициативе компаний Enikia и Intellon, в 2001 г. утвердил первую спецификацию стандарта Home Plug 1.0 технологии передачи цифровых дан-

ных по сети электропитания со скоростью передачи информации до 14 Мбит/с. [8]. Это событие стало результатом более чем 500 объективных испытаний разработанных технических решений и устройств в реальных зданиях, при которых была достигнута скорость передачи информации через сеть электропитания в пределах здания 14 Мбит/с. Зарегистрирован также фирменный знак альянса "Home Plug Certified". В состав альянса входит около сотни крупных фирм всего мира, в том числе Intel, Hewlett-Packard, Motorola, Philips, Samsung, Sony, Panasonic, Sanyo, Sharp, Matsushita, France Telecom.

Следует отметить достигнутые к настоящему времени практически важные результаты исследований и разработок по созданию информационных систем на основе сети электропитания с более высокой скоростью передачи информации — до 45 Мбит/с.

Компанией Intellon (США) разработана технология Power Packade™, которая решает проблемы адаптации системы к изменениям характеристик канала, защиты информации, устранения интерференции, достижения высокой скорости передачи информации и др. Технология послужила основой для стандарта Home Plug 1.0.

На международной выставке "ВКСС 2002" была продемонстрирована возможность построения компьютерных сетей с использованием электропроводки на основе технологии Home Plug 1.0. При демонстрации расстояние между устройствами составляло 5 метров. Скорость обмена информацией составила до 10 Мбит/с. Устройства были подключены к компьютеру через USB-порты.

Компания Intellon предлагает полный спектр продукции для передачи информации по сетям электропитания начиная от системного решения и средств проектирования сети до набора микросхем [17].

В настоящее время альянс Home Plug Alliance ведет работы по созданию следующей версии технологии Home Plug 2.0 — Home Plug AV, позволяющей значительно повысить скорость передачи информации и обеспечить передачу мультимедийной информации, в том числе и для передачи как стандартного телевизионного сигнала, так и телевизионного сигнала высокой четкости.

В США и Канаде альянсом Home Plug Alliance ведутся интенсивные работы по созданию локальных домашних сетей, обеспечивающих соединение компьютера с другими передающими и принимающими устройствами в помещениях со скоростью до 14 Мбит/с с выходом в сеть Internet. Рыночный потенциал для нового промышленного стандарта в Северной Америке оценивается в 12 млн. семей.

Фирмой ITRAN Communications (Израиль) разработана и запатентована технология дифференциальной кодовой манипуляции (DCSK) с использованием SS-модуляции в полосе частот 4—20 МГц с турбокомпенсацией и сжатием кода [4, 18].

В Европе значительных результатов в использовании электросети для информационных целей добился ведущий поставщик электроэнергии Германии AG RWE GmbH, который на основе технологии Powelein

обеспечивает подключение пользователей к Internet через собственные электросети со скоростью 2 Мбит/с, т. е. большей, чем достигается в телефонной сети. При этом использовались модемы швейцарской фирмы ASCOM. В экспериментальных исследованиях достигнута скорость передачи в электросети 45 Мбит/с. Рынок потребителей данного вида услуг в Германии оценивается более чем в 100 тыс. абонентов. Фирма осуществляет внедрение достигнутых результатов также в Бразилии.

Следует подчеркнуть особое внимание к развитию этого направления во Франции. Специальной государственной программой предусматривается обеспечение в течение 5 лет высокоскоростного подключения любого жителя страны к Internet через электросеть, для чего выделяется около 1,3 млрд. \$ кредитных средств.

Работы по обеспечению высокоскоростного доступа к Internet проводятся также и в других европейских странах — Дании, Австрии, Испании.

В последние годы интенсивное развитие направления осуществляется в Японии компанией Kansai Electric Power, чей стандарт обеспечивает передачу данных через электросеть со скоростью 24 Мбит/с в полосе частот 4—20 МГц. Другая фирма — Sofbank уже достигла скорости передачи данных в электросети 40 Мбит/с в полосе частот 8—32 МГц.

Мировыми фирмами производятся и реализуются на рынке модемы для использования в сети электропитания для передачи информации — например, трансивер SSC P485 фирмы Intellon (скорость передачи информации 10 Кбит/с, протокол CEBus), модем PassPort фирмы Intelogis (скорость 350 Кбит/с, протокол Plug-In), трансивер ITM1 фирмы ITRAN (скорость 1500 Кбит/с, протокол Ethernet) [4].

На территории СНГ работы в данном направлении ведутся в России, Украине, Молдове, Беларуси, Казахстане.

ОАО «Ангстрем» (г. Зеленоград, Россия) производит ИС приемопередатчика по сети переменного тока КР 1446ХК1, которая позволяет получить скорость передачи информации по электрическим сетям до 992 бит/с [19].

Информационно-аналитическим центром научно-технических исследований «Континиум» (г. Москва, Россия) разработан комплект аппаратуры для построения системы учета электроэнергии на основе электросети [20]. С использованием аппаратуры введен в эксплуатацию ряд систем учета электроэнергии многоквартирных жилых домов. Аналогичный комплект аппаратуры производит и внедряет на объектах ООО «TeleTec» (г. Одесса, Украина) [21].

В г. Зеленограде (Россия) осуществлен доступ ко всемирной сети Internet по сети электропитания со скоростью доступа 2—12 Мбит/с на расстоянии до 350 метров [5, 22].

Достигнутые результаты исследований и разработок показывают актуальность и перспективность использования сети электропитания для построения информационных систем.

Выводы

1. Сеть электропитания представляет собой готовую кабельную сеть с большим частотным ресурсом, пригодную для построения информационных систем.

2. Основными трудностями при создании практических информационных систем на основе сети электропитания являются высокий уровень помех, нестационарность нагрузочных характеристик, значительные частотные затухания, необходимость межфазного перехода.

3. Мировыми фирмами получены конкретные результаты исследований, производятся и реализуются на рынке модемы для передачи данных в сети электропитания со скоростью до 1,5 Мбит/с.

4. Перспективу развития направления составляет создание на основе сети электропитания локальных компьютерных систем с выходом в Internet, информационных систем контроля и управления, локальных систем телефонной связи.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Передача информации в энергосистемах / Под. ред. В. Х. Ишкина. — М.: Энерго-издат, 1988.
2. Колесниченко Д. По высоковольтным линиям электропередачи // Сети и телекоммуникации. — 2002. — № 7. — С. 37.
3. Калужный В. Ф. Пути интенсификации использования проводных сетей и создания «проводного эфира» // Труды международной академии связи. — 2000. — № 2. — С. 17—20.
4. Лагутенко И. О. Современные модемы. — М.: Эко-Трендз, 2002.
5. Подгурский Ю. Электропитание с информационной правой // Сети и телекоммуникации. — 2002. — № 7. — С. 32—37.
6. Макаров В. А., Савин А. Ф. Интернет из электрической розетки // Вестник связи. — 2002. — № 11. — С. 86—87.
7. Непокучинский И. Трансивер для передачи данных по электросети // Сети и телекоммуникации. — 2002. — № 7. — С. 33.
8. Кондратенко П. Связь по электропроводке // Компьютеры и средства связи. — 2003. — № 1. — С. 24—37.
9. Кучеренко Ю. Домашние сети на электропроводах — время пришло? // Компьютерное обозрение. — 2003. — № 18—19. — С. 24—37.
10. Лозовой И. А. Сельские системы передачи в век Интернета // Вестник связи. — 2003. — № 1. — С. 68—73.
11. Семенко А. И., Юрчук А. П. Построение информационных систем с использованием сети электропитания // Труды 5-й Междунар. науч.-практич. конф. «Современные информационные и электронные технологии». — Одесса. — 2005. — С. 21.
12. <http://www.osp.ru/nets/1999/10/05.htm>.
13. http://ccc.ru/magazine/depot/02_06/0101.htm.
14. http://www.telecomforum.ru/vesti/1999/03/05_02.htm.
15. <http://www.intelogis.com>.
16. <http://www.3dnews.ru/reviews/communication/homenet>.
17. <http://www.compulenta.ru/2001/6/26/14840>.
18. <http://www.itrancomm.com>.
19. Приемопередатчик по сети переменного тока КР 1446ХК1 // Радиоаматор. — 2002. — № 11. — С. 56—57.
20. Система автоматизированного контроля и учета энергоресурсов «Континиум». Технические условия. ТУ 4205-004-17915838-00. — М.: 2000.
21. Комплекс средств для построения автоматизированной системы сбора и учета электроэнергии. — Одесса: ООО «Tele Tec», 2005. — www.teletec.com.ua.
22. <http://www.andstrem.ru/pdf/kr1446xkl.pdf>.

К. ф.-м. н. С. Д. ВОТОРОПИН

Россия, г. Томск, НИИ полупроводниковых приборов
E-mail: Votoropin@mail.tomsknet.ruДата поступления в редакцию
06.02 2006 г.Оппонент В. И. МАЙ
(НПП "Сатурн", г. Киев)

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АВТОДИННЫХ ГИС КВЧ НА ДИОДАХ ГАННА

Рассмотрено конструирование основных узлов и элементов автодинных генераторов в гибридно-интегральном исполнении и технология их изготовления.

Автодинные генераторы (автодины) представляют собой приемо-передающие устройства, которые выполняют одновременно функции передатчика, приемника, усилителя и детектора отраженного сигнала [1—3]. Поэтому автодинный принцип построения разнообразных приборов (систем) СВЧ по сравнению с другими (гомодинным, гетеродинным) позволяет создавать высокочувствительные устройства с наиболее простым, миниатюрным и дешевым СВЧ-модулем. Анализ режимов их функционирования посвящены работы [4—7].

Автодины применяются в различных областях науки и техники — радиоспектроскопии, измерительной технике для определения физических характеристик веществ и экспресс-анализа параметров технологических процессов. Особенно широкое применение автодины получили в системах ближней радиолокации. Миниатюризация и низкая стоимость автодинов достигается использованием технологии гибридно-интегральных схем (ГИС).

Конструктивно-технологические особенности узлов автодинных ГИС [8—13]

Анализ конструкций гибридно-интегральных схем на микрополосковых линиях передач выявил две основные причины, препятствующие созданию автодинных ГИС крайне высоких частот (КВЧ) на микрополосковых линиях (МПЛ) передачи:

— чрезмерное уменьшение линейных размеров топологии ГИС, что создает трудности для монтажа кристалла корпусных активных компонентов;

— увеличение потерь на излучение в МПЛ, ее резонансных отрезках, а также потерь в объеме диэлектрической подложки.

Конструктивно ГИС СВЧ- и КВЧ-диапазонов состоят из платы (диэлектрической подложки) и корпусного или бескорпусного активного элемента (кристалла, чипа), которые изготавливаются отдельно. На плате формируется пассивная часть схемы, включающая отрезки микрополосковых линий передач, выполняющих функции резонаторов, трансформаторов, выходных линий передач, фильтр нижних частот цепи питания, контактные площадки. Плата ГИС изготов-

ливается методом тонкопленочной технологии на диэлектрической подложке. Технология изготовления платы включает вакуумное послойное напыление пленок "хром—медь—никель" или "хром—золото" с последующей фотолитографией, гравировкой и электрохимическим осаждением золота. В качестве материала подложки используется поликор, предпочтительный благодаря его высоким электрофизическим параметрам и механической прочности; реже используется элантинит, теплонит, кварц, сапфир и другие диэлектрики.

Создание ГИС с требуемыми параметрами в диапазоне крайне высоких частот натолкнулось на значительные трудности, что, очевидно, связано с отсутствием эффективных методов анализа конструкций ГИС КВЧ или недостаточной разработанностью имеющихся. Рассмотрим эту задачу подробнее.

Наименьшими ограничениями на геометрические размеры при приемлемых волновых сопротивлениях для создания резонансных систем ГИС КВЧ обладают планарные разновидности полосковых линий передач — щелевая (ЩПЛ) и копланарная (КПЛ). Эти линии характеризуются наличием металлических проводников, нанесенных на одну поверхность диэлектрической подложки и разделенных щелями, причем электромагнитная волна распространяется вдоль щелей. Копланарная и щелевая полосковые линии передач, а также их разновидности, довольно широко используются при создании СВЧ- и КВЧ-смесителей, модуляторов, переключателей, гибридных мостов и пр. Эти линии передач используются и при разработке невзаимных устройств на ферритовых подложках, поскольку продольные и поперечные компоненты H -волны сдвинуты по фазе на 90° и магнитное поле в линии эллиптически поляризовано. В подобных конструкциях смесительные, детекторные и управляющие диоды, как правило, монтируются на проводник полосковой линии и связываются с ней посредством петли связи, образованной проводником, пересекающим ее зазор. Потери в этих линиях ниже по сравнению с МПЛ, т. к. токи в ЩПЛ и КПЛ рассредоточены по большей поверхности.

Однако в отличие от преобразовательных пассивных ГИС, автодинные генераторные модули характеризуются сравнительно большим уровнем потребляемой мощности по цепи питания. Это приводит к существенным ограничениям на возможность использования того или иного материала подложки, обус-

лавливает необходимость уменьшения толщины подложки и выбора способа ее монтажа на основание-теплоотвод.

Активные нелинейные элементы автотинных ГИС на диодах Ганна

Для изготовления полупроводникового кристалла диода Ганна используется четырехслойная эпитаксиальная структура арсенида галлия (ЭСАГ) типа $n^{++}n^+m^+$, где n^{++} — высоколегированная подложка толщиной, как правило, 300 мкм с концентрацией носителей заряда $N \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; n^+ — буферный эпитаксиальный слой, предотвращающий проникновение дефектов из подложки в активный n -слой; n — активный слой толщиной 1,5—3 мкм с концентрацией $N=10^{15} \dots 10^{16} \text{ см}^{-3}$; m^+ — контактный эпитаксиальный слой, предотвращающий нарушение n -слоя при формировании омического контакта.

Концентрация носителей N и толщина активного слоя d_n связаны между собой и с частотой генерации f соотношениями $N/f > 2 (1,5 \dots 6) \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$; $10^{10} \text{ см}^{-2} < Nd_n < 2,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, которые следуют из анализа процессов формирования и рассасывания области объемного заряда в активной области диода Ганна.

При изготовлении кристалла диода применяются технологические процессы вакуумного напыления сплава "золото—германий" для формирования омического контакта, фотолитографии, формирования мезаструктуры, электрохимического осаждения золота. Продолжительность технологического цикла составляет 10—15 дней.

В настоящее время применяются два способа монтажа кристалла — прямой и обратный. В первом случае анодным электродом диода является его корпус, во втором — крышка. Обе конструкции диодов приведены на рис. 1. Последний вариант имеет меньшее тепловое сопротивление. Размеры кристаллов $200 \times 200 \times 70$ мкм, площадь мезаструктуры 2000—20000 мкм².

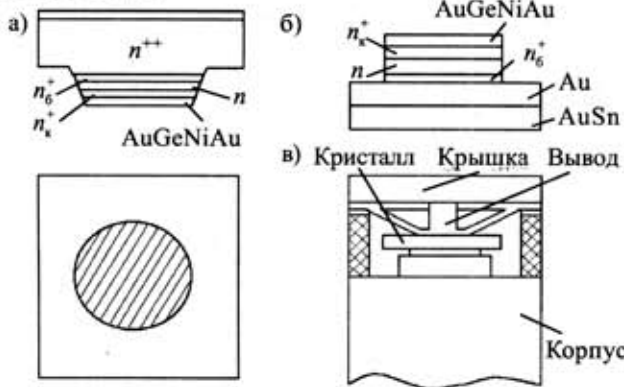


Рис. 1. Конструкция кристалла диода Ганна на сэндвич-структуре для обратного (а), прямого (б) монтажа и "кристалл в корпусе" (в, обратный монтаж)

Размещение и монтаж кристалла на подложке должен обеспечивать тепловой режим активной мезаструктуры и включение ее в электромагнитное поле резонатора. При разработке диодов Ганна на кристалле традиционно формируют мезаструктуру круглой формы, представленную на рис. 1, а. При создании ГИС КВЧ были разработаны кристаллы с тре-

угольной, квадратной и прямоугольной формой мезаструктур (рис. 2). При этом были созданы кристаллы диодов Ганна на сильно легированных подложках GaAs типа АГЭТ с планарными катодным и анодным электродами [7—9].

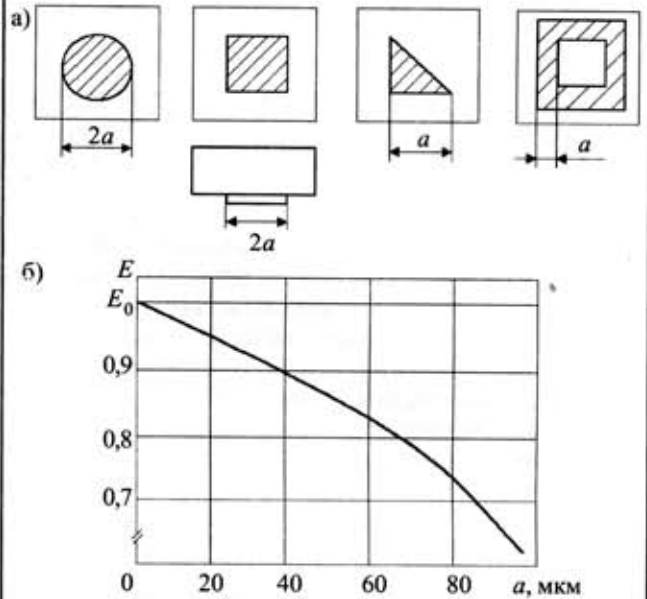


Рис. 2. Конфигурация мезаструктур активных элементов диодов Ганна (а) и зависимость средней интегральной напряженности поля E (б)

Оценка эффективности кристаллов с различной формой мезаструктур проводилась в предположении малости геометрических размеров кристалла по сравнению с рабочей длиной волны, т. е. из расчета однородности напряженности поля по его площади.

Для оценки эффективности работы мезаструктуры определим усредненную интегральную напряженность поля внутри его активного слоя в зависимости от формы мезаструктуры при сохранении ее площади. С учетом скин-эффекта имеем:

$$E = \frac{E_0}{S_0} \iint_S e^{-\beta x} dS, \quad (1)$$

- где E_0 — напряженность поля на внешней границе мезаструктуры;
- S_0 — площадь мезаструктуры;
- β — декремент затухания — $\beta = (\pi \mu_0 \sigma f)^{-1/2}$;
- σ — проводимость активного слоя — $\sigma = qn\mu$;
- q — элементарный заряд — $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл;
- n — концентрация носителей заряда в активном слое — $n = 6 \cdot 10^{15} \dots 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$;
- μ_0 — магнитная постоянная — $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Г/м}$;
- μ — подвижность электронов активного слоя — $\mu = 6000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$;
- f — рабочая частота;
- x — текущее расстояние от границы мезаструктуры до ее центра или центральной оси (в случае прямоугольной мезаструктуры).

Для кристалла с круглой формой мезаструктуры для значения средней интегральной напряженности поля имеем:

$$E_{\text{ср}} = E_0 \frac{1 - e^{-\beta r}}{\beta r}, \quad (2)$$

а для прямоугольной —

$$E_{\text{сп}} = E_0 \frac{1 - e^{-\beta a}}{\beta a}, \quad (3)$$

где r — радиус круглой мезаструктуры;
 a — половина наименьшей стороны прямоугольной мезаструктуры.

Для обеспечения механической прочности кристалла размер a должен быть не менее 25 мкм.

Проведенные расчеты показали, что значение средней интегральной напряженности поля прямоугольной мезаструктуры, как правило, на 30—40% превышает ее значение для круглой формы мезаструктуры. На рис. 2, б приведены зависимости средней интегральной напряженности поля E в единицах E_0 для мезаструктур различной формы и конкретных параметров активного слоя кристалла. Экспериментальные исследования диодов Ганна показали, что КПД диодов с прямоугольной, квадратной и треугольной формой превышает КПД диодов с круглой мезаструктурой на величину до 40%. Это объясняется влиянием скин-эффекта с учетом квадратичной зависимости КПД диода Ганна от напряженности поля на нем, а также некоторым облегчением теплового режима кристалла.

Тепловой расчет гибридно-интегральной схемы

С целью правильного выбора материала подложки необходимо провести тепловой расчет конструкции ГИС, в ходе которого определяется температура активного слоя кристалла, в значительной степени влияющая на основные электрические параметры ГИС, ее надежность и предельные режимы эксплуатации. Моделью для расчета служит конструкция, изображенная на рис. 3.

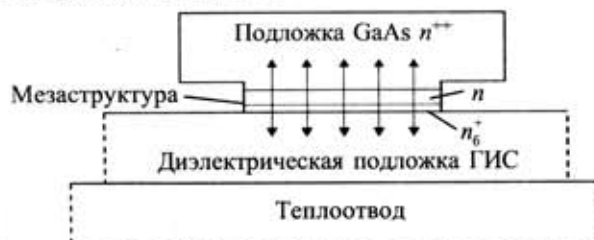


Рис. 3. Модель для теплового расчета

Температура активного слоя кристалла определяется выражением

$$T_{\text{ac}} = T_0 + P \sum_{i=1}^N R_i, \quad (4)$$

где T_0 — температура окружающей среды;
 P — мощность, потребляемая активной областью кристалла;
 R_i — тепловые сопротивления различных слоев.

Тепловое сопротивление структуры складывается из тепловых сопротивлений различных слоев:

$$R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N R_i = R_0 + R_{\text{д}} + R_{\text{к}} + R_{\text{ac}}, \quad (5)$$

где $R_0 + R_{\text{д}}$ — тепловое сопротивление основания-теплоотвода;
 $R_{\text{к}}$ — тепловое сопротивление контактного n^+ -слоя;
 R_{ac} — тепловое сопротивление активного n -слоя.

Значения $R_{\text{к}}$ и R_{ac} определяются согласно известному уравнению теплопроводности для цилиндра:

$$R_{\text{к}} = d/\lambda_{\text{к}}S; R_{\text{ac}} = d/2\lambda_{\text{ac}}S, \quad (6)$$

где $d, \lambda_{\text{к}}$ — толщина и теплопроводность контактного слоя;
 d, λ_{ac} — толщина и теплопроводность активного слоя;
 S — площадь мезаструктуры.

Определение значений R_0 и $R_{\text{д}}$ сводится к решению уравнения Лапласа с граничными условиями, определяемыми положением и размерами активного элемента, подложки и теплоотвода. Для цилиндрического диэлектрика эта задача решена в [14, 15], а результаты изображены на рис. 4. Значение $R_0 = 1/\pi r \lambda_{\text{т}}$, где r — радиус мезаструктуры; $\lambda_{\text{т}}$ — теплопроводность основания-теплоотвода.

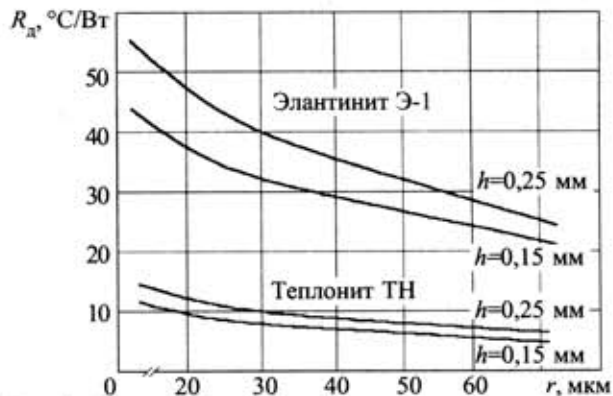


Рис. 4. Зависимость теплового сопротивления подложки цилиндрической формы диаметром 3 мм от размера мезаструктуры (h — толщина подложки)

Расчет, выполненный согласно приведенным соотношениям, показывает, что рассматриваемая конструкция работоспособна только при использовании материала подложки с повышенной теплопроводностью. В качестве таких материалов можно использовать “Элантинит-1” (Э-1), “Теплонит” (ТН), окись бериллия или глубоко прокисленный сплав алюминия типа АМГТ. Подложки Э-1 (элантинит, нитал) изготавливаются из поликристаллического нитрида алюминия и имеют теплопроводность до 100 Вт/(м·К), что в три раза превышает теплопроводность поликоревой подложки. Подложки ТН (теплонит) изготавливаются на основе нитрида бора и имеют теплопроводность 400—700 Вт/(м·К). Подложки из окиси бериллия также серийно освоены, но токсичны, что предполагает их обработку со специальными мерами защиты и ограничивает применение.

Результаты расчета теплового сопротивления конструкции ГИС согласно изложенной методике [16] приведены в таблице.

Параметр	Тепловое сопротивление, К/Вт	Элемент конструкции ГИС
R_{ac}	4—7	Активный слой кристалла
$R_{\text{к}}$	3—6	Контактный слой кристалла
R_0	1—3	Основание-теплоотвод
$R_{\text{д}}$	25—40	Диэлектрическая подложка
Суммарное тепловое сопротивление R_{Σ}	33—50	

Принимая предельную рабочую температуру ГИС равной 230°C и температуру окружающей среды +70°C, получаем, что при использовании материала подложки Э-1 при ее толщине 0,15—0,25 мм потребляемая мощность активного элемента ГИС ограничена 2—3 Вт, а при использовании подложки ТН возможно применение активных элементов ГИС мощностью до 8 Вт.

Однако для определения возможности применения диэлектрической подложки в ГИС КВЧ необходимо учитывать и значения ее основных электрофизических параметров, а также стойкость к механическим перегрузкам. Для подложки Э-1 с диэлектрической проницаемостью $\epsilon=7,5 \dots 8$ при тангенсе угла диэлектрических потерь в КВЧ-диапазоне $\text{tg}\delta=5 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-3}$.

Вопросы теплового анализа диодов Ганна и конструкций ГИС, их использующих, рассмотрены в работах [14, 15, 17, 18]. Согласно этим данным тепловое сопротивление диода Ганна, выполненного способом "обратного монтажа" (катодный электрод кристалла смонтирован термозлектрозвуковой сваркой на пьедестале кристаллодержателя-теплоотвода), составляет 20—30 К/Вт и послойно распределено следующим образом: n -слой — 5—12 К/Вт; n^+ -слой — 5—10 К/Вт; теплоотвод — 3—7 К/Вт.

Расчеты [1, 2, 14, 15, 17, 18] показывают, что значительный вклад в величину теплового сопротивления диода Ганна вносит n^+ -слой в случае его монтажа на кристаллодержатель.

Электродинамический анализ планарных линий передач

Планарные линии широко используются при создании различного рода преобразователей частоты, а также при создании пассивных цепей КВЧ-устройств, что связано с высокой технологичностью и возможностью эффективной подстройки ГИС на этих линиях передачи [19, 20]. Но при использовании навесных полупроводниковых элементов с большим выделением тепла необходимо монтировать диэлектрическую подложку с планарной линией на металлическое основание-теплоотвод. В этом случае нарушается структура электромагнитной волны, распространяющейся в линии, изменяются ее характеристики.

Большое значение для правильного построения ГИС КВЧ имеет электродинамический анализ используемых линий передачи. Имеется множество работ, в которых подробно рассмотрена микрополосковая, щелевая полосковая, копланарная полосковая и более сложные конфигурации линий передачи. Однако часто приходится применять новые разновидности линий передачи. А поскольку строгий электродинамический анализ связан со значительными затратами времени, то более практичны сравнительно простые численные методы.

Аналитические методы электродинамического анализа связаны с решением в общем случае уравнения второго порядка в частных производных с известными начальными и граничными условиями. В качестве методов решения подобных уравнений наиболее часто применяются метод разделения переменных, метод конечных интегральных преобразований, метод функций Грина, операционный метод и метод конеч-

ных разностей (метод сеток). Первые три метода применимы только для решения линейных дифференциальных уравнений с линейными граничными условиями, что сильно ограничивает область их применения. Метод функций Грина связан со сложными аналитическими построениями.

Универсальным методом решения дифференциальных уравнений (с точностью, достаточной для инженерного расчета), не связанным со сложными аналитическими выкладками, является метод конечных разностей. В этом случае исходное дифференциальное уравнение заменяется системой алгебраических уравнений, число которых равно числу узлов сеточной функции. Полученная система уравнений с соответствующими сеточными начальными и граничными условиями решается с помощью вычислительной техники. Подобный метод решения был применен для анализа одной из разновидностей копланарной линии [21]. Он оказался достаточно простым и точным по сравнению с традиционными методами анализа, например [22]. Но в случае, когда конструкция ГИС КВЧ не отличается новизной, оправданы простые инженерные методы расчета.

Следует отметить, что приближения подобных расчетов в части описания нелинейности вольт-амперной и вольт-фарадной характеристик диода Ганна, а также отсутствие модели, описывающей инерционные механизмы эффекта Ганна, приводят к не совсем корректному применению этого подхода для ГИС КВЧ-диапазона.

Применительно к расчету ГИС КВЧ-диапазона в работе [23] показано, что характеристика "скорость—поле" диода Ганна имеет существенный гистерезис, что связано с проявлением инерционных свойств механизма междолинного переноса электронов в активном слое диода. Величина гистерезиса тем больше, чем выше его рабочая частота. При пересчете характеристики "скорость—поле" в вольт-амперную характеристику диода Ганна оказывается, что при подаче на него прямого и обратного напряжения смещения пороговые токи диода на рабочей частоте 32 ГГц отличаются на 50%, что показывает важность учета этого явления в расчетах. Моделирование ВАХ диода с гистерезисом может быть проведено путем задания зависимости тока проводимости диода Ганна от скорости его изменения, что и выполнено в данной работе.

Копланарная линия передачи, предназначенная для использования в ГИС с повышенным выделением тепла на поверхности диэлектрической подложки, представлена на рис. 5. В работе [22] отмечено, что подобная линия передачи имеет большие потери, связанные с возникновением электромагнитной волны в объеме диэлектрика между металлическими плоскостями. Этот эффект связан с тем, что фазовая скорость распространения волны в диэлектрике $c/\sqrt{\epsilon}$

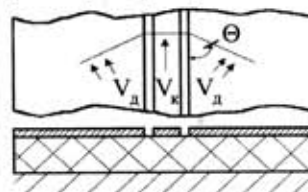


Рис. 5. Копланарная полосковая линия передачи на металлическом основании и фронт электромагнитной волны, распространяющейся в ней

меньше фазовой скорости распространения волны в копланарной линии $c\sqrt{2/(\epsilon+1)}$, где c — скорость света. Фронт волны, распространяющейся в диэлектрике, расположен по отношению к копланарной линии под углом $\Theta = \arccos \sqrt{(\epsilon+1)/2\epsilon}$. При данном механизме распространения электромагнитной волны до трети энергии теряется на излучение в подложку. Это, по-видимому, явилось основной причиной того, что данная разновидность копланарной линии практически не исследовалась.

С целью уменьшения потерь КВЧ-энергии автором была разработана разновидность копланарной линии, изображенной на рис. 5. Она отличается от предыдущей линии [11] наличием в объеме подложки двух металлических экранов, расположенных эквидистантно относительно краев щели копланарной линии [16, 24]. Расстояние от экрана до края щели при линейном резонаторе выбиралось так, чтобы электромагнитная волна, распространяющаяся в диэлектрике, отразившись от экрана, совпала бы по фазе с волной, распространяющейся в копланарной линии вдоль щелей. Решая тригонометрическую задачу, вытекающую из рис. 6, с учетом значений фазовых скоростей распространения электромагнитных волн в линии и в диэлектрике подложки, получаем для расстояния от экрана до края щели прямолинейного отрезка линии передачи выражение

$$\theta_n = \frac{c}{4f\sqrt{\epsilon}} \sqrt{\frac{\epsilon-1}{2\epsilon}}, \quad (7)$$

где f — частота колебаний электромагнитной волны.

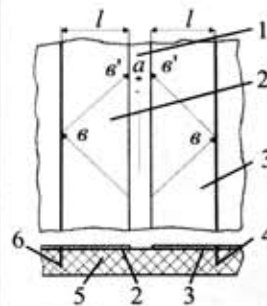


Рис. 6. Экранированная щелевая полосковая линия передачи: 1 — щелевая полосковая линия передачи; 2, 3 — металлические проводники топологии ЩПЛ; 4, 6 — металлические экраны; 5 — диэлектрическая теплопроводящая подложка “элантинит”

Эффективность данного решения тем выше, чем ближе расположен экран к копланарной линии, т. е. чем меньше зазор.

В случае включения активного элемента в кольцевой щелевой резонатор повышение добротности резонатора достигается за счет уменьшения потерь в диэлектрической подложке, а токопроводящий экран в ее объеме формируется на расстоянии

$$\theta_z = R \left(1 + \frac{c^2}{16f^2 R^2 \epsilon} + \frac{c \sqrt{(\epsilon-1)/2\epsilon}}{2f R \sqrt{\epsilon}} \right)^{1/2}, \quad (8)$$

где R — радиус кольцевого резонатора; f — рабочая частота.

Экран сформирован перпендикулярно плоскости подложки в виде канавки на всем протяжении и эквидистантен относительно границы топологии резонансной системы ГИС в узлах электрической со-

ставляющей поля стоячей волны. Расположение экрана в узлах электрической составляющей электромагнитного поля является оптимальным, поскольку в противном случае появляются токи КВЧ, замыкающиеся через канавку экрана, которые приведут к дополнительным потерям [10].

Для проверки правильности приведенных выше соотношений, а также эффективности технического решения, была экспериментально исследована зависимость затухания КВЧ-энергии в разработанной копланарной линии от расстояния между щелями и экранами. Экраны формировались в объеме подложки (элантинит) при помощи лазера с плотностью падающей мощности на поверхности подложки не менее 10^5 Вт/см². Воздействие лазерного излучения на подложку в воздушной среде приводит к реакции диссоциации алюминия $AlN+O_2=Al+NO_2$, который осаждается на стенках канавки, прорезаемой лазерным лучом. Геометрические размеры канавки и толщина слоя металлизации определяются интенсивностью луча лазера и его фокусировкой. Исследования проведены в восьмимиллиметровом диапазоне длин волн с помощью панорамного измерителя Р2-65 и двух измерительных переходов с коэффициентом стоячей волны по напряжению $K_{ст} U < 1,2$. Экспериментально установлено, что при длине линии передачи 10 мм разность значений потерь КВЧ-энергии в копланарной линии с оптимальным и неоптимальным расстояниями от экранов до щелей составляет 8—10 дБ, причем значения оптимальных расстояний совпали с расчетными с точностью до 3—5% в зависимости от рабочей частоты.

Использование разработанной копланарной линии передачи [16, 24] в ГИС КВЧ предусматривает определение, по крайней мере, ее волнового сопротивления и погонной емкости. В работе [22] рассмотрен численный метод решения электродинамической задачи для разновидности копланарной линии, близкой к рассматриваемой. Будучи достаточно простым, он позволяет получить характеристики копланарной линии с точностью 1—2%, что вполне достаточно для практического применения. Методика этого решения была взята за основу при анализе копланарной линии с размерами, определенными на рис. 7. Решение уравнений Максвелла для этой задачи сводится к решению уравнения Лапласа относительно потенциала ϕ как функции координат x, y с граничными условиями, определяемыми геометрией копланарной линии. Искомое значение $\phi(x, y)$ находится в виде ряда, весовые коэффициенты которого определяют вклад различных гармонических составляющих электромаг-

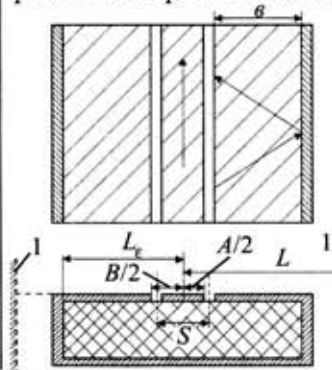


Рис. 7. КПЛ с боковыми металлическими экранами и направление распространения электромагнитной волны в ней: 1 — введенные металлические экраны для теоретического анализа КПЛ; L, L_s — расстояния от оси симметрии центрального полоска копланарной линии до экрана

нитной волны, распространяющейся в копланарной линии, в формирование функции потенциала $\varphi(x, y)$. Соответственно в воздухе:

$$\varphi_{\text{в}}(x', y') = \sum_{i=1}^N a_i \cos(k_i x') \exp(-k_i y'), \quad (9)$$

в диэлектрике:

$$\varphi_{\text{д}}(x, y) = \sum_{i=1}^N b_i \cos(k_{ie} x) \text{sh}(k_{ie} y), \quad (10)$$

где $\varphi_{\text{в}}$ — решение уравнения Лапласа относительно потенциала электромагнитной волны, распространяющейся в воздухе;

$\varphi_{\text{д}}$ — решение уравнения Лапласа относительно потенциала электромагнитной волны, распространяющейся в диэлектрике;

a_i, b_i — весовые коэффициенты решения уравнения Лапласа для соответствующих потенциалов;

k_i, k_{ie} — постоянная распространения i -й гармонической составляющей электромагнитной волны;

x', y', x, y — координаты для областей воздуха и диэлектрика, соответственно.

$$k_i = (2i-1) \frac{\pi}{2L} \Big|_{i=1}^N; \quad k_{ie} = k_i \frac{L}{L_e}. \quad (11)$$

Граничное условие на поверхности диэлектрика сводится к равенству

$$a_i \cos(k_i x) = b_i \cos(k_{ie} x) \text{sh}(k_{ie} h), \quad (12)$$

где h — толщина подложки.

Из условия равенства тангенциальных составляющих электрического поля имеем:

$$\sum_{i=1}^N a_i k_i \cos(k_i x) + k_{ie} b_i \cos(k_{ie} x) \varepsilon_r \text{ch}(k_{ie} h) = 0 \Big|_{\frac{A}{2} < x < \frac{B}{2}} \quad (13)$$

или

$$\sum_{i=1}^N a_i k_i \cos(k_i x) [1 + L/L_e \varepsilon_r \text{cth}(k_i h)] = 0, \quad (14)$$

где ε_r — диэлектрическая проницаемость подложки.

Учитывая, что структура поля в данной копланарной линии симметрична относительно центрального полоска и характеристики линии не зависят от амплитудных характеристик волны, полагаем его потенциал равным единице, а потенциал бокового металлического слоя равным нулю, т. е.

$$\sum_{i=1}^N a_i \cos(k_i x) = \begin{cases} 1 & \text{при } x \leq A/2; \\ 0 & \text{при } x \geq B/2. \end{cases} \quad (15)$$

Для решения задачи численным методом определяем значение $x_j = jL/(N+1) \Big|_{j=1}^N$ и составляем систему уравнений

$$\sum_{i=1}^N m_{ji} a_i = d_j \Big|_{j=1}^N, \quad (16)$$

где $m_{ji} = k_i \cos(k_i x_j) [1 + L/L_e \varepsilon_r \text{cth}(k_i h)]$ при $A/2 < x < B/2$;

$m_{ji} = \cos(k_i x_j)$ при $x_j \leq A/2, x_j \geq B/2$; $d_j = 0$ при $x_j > A/2$ и $d_j = 1$ при $x_j \leq A/2$, что вытекает из приведенных равенств.

Данная система алгебраических уравнений относительно значений a_i решалась методом Гаусса.

Определив значения a_i с учетом величины потенциала бокового проводника копланарной линии, равного 0, вычислим погонную емкость

$$C = \varepsilon_0 \oint_S \varepsilon_r \nabla \varphi dS = 2\varepsilon_0 \sum_{i=1}^N a_i \sin[k_i (A+B)/4] \times [1 + L/L_e \varepsilon_r \text{cth}(k_i h)] \quad (17)$$

и волновое сопротивление

$$Z_0 = \frac{1}{c \sqrt{CC_0}}; \quad C_0 = C(\varepsilon_r = 1). \quad (18)$$

Результаты проведенных расчетов используются при определении геометрических размеров элементов пассивной части ГИС.

Из приведенных зависимостей следует, что положение экранов существенно влияет на характеристики копланарной линии. Так, уменьшение расстояния до экрана от края щели с 1 до 0,5 мм приводит к изменению волнового сопротивления на 20—50% и погонной емкости — на 40—80%, что необходимо учитывать при конструировании ГИС.

Выводы

Рассмотрены конструкции основных узлов и элементов автодинных генераторов в гибридно-интегральном исполнении. Проведены экспериментальные исследования различных конструкций кристаллов диодов Ганна. Установлены оптимальные соотношения площадей, формы и взаимного расположения анодного и катодного контактов, сформированных в одной плоскости на эпитаксиальной структуре, выращенной высоколегированной подложке GaAs n^{++} -типа для многомезовой планарной структуры диода Ганна. Обосновано применение щелевых и копланарных полосковых линий передачи (ЩПЛ и КПЛ) в качестве резонаторов, проведен анализ экранированных ЩПЛ и КПЛ, который позволяет оптимизировать их параметры по волновому сопротивлению и потерям. Проведен тепловой расчет ГИС на основе теплопроводящей диэлектрической подложки типа нитал (AlN). Найден технологические приемы изготовления данных линий передачи, обладающих пониженными потерями на излучение, и показана эффективность применения КПЛ и ЩПЛ при создании ГИС различного назначения.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Воторопин С. Д. Исследование путей создания автодинных приемопередающих модулей в диапазоне 3—8 мм: Отчет по НИР "Тамаринд" (НИИПП, г. Томск).— 1989.
2. Воторопин С. Д. Разработка автодинных датчиков 5-мм диапазона длин волн для транспортной электроники: Отчет по ОКР "Тигель" (НИИПП, г. Томск).— 1991.
3. Воторопин С. Д. Автодинные датчики КВЧ // IV Междунар. конф. "Российские технологии для индустрии. Физические, химические и биологические сенсоры".— Санкт-Петербург.— 2000.— С. В8.
4. Смольский С. М., Воторопин С. Д., Савков Н. Н. Автодинные ЧМ-локаторы КВЧ-диапазона с непрерывным излучением // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2005.— № 1.— С. 7—13.
5. Votoropin S. D., Noskov V. Ya. Analysis of operating regimes of EHF hybrid-integrated autodyne based on the Gunn

micro power mesa planar diodes // Russian Physics Journal.— 2002.— Vol. 45, N 2.— P. 195—206.

6. Votoropin S. D., Noskov V. Ya. General model and basic equations for an EHF autodyne HMC based on the Gunn planar mesas // Ibid.— 2001.— Vol. 44, N 12.— P. 1273—1282.

7. Воторопин С. Д., Носков В. Я. Приемопередающие модули на слаботочных диодах Ганна для автодинных систем // Электронная техника. Сер. СВЧ-техника.— 1993.— Вып. 4.— С. 70—72.

8. Пат. 2064718 РФ. Диод Ганна / С. Д. Воторопин, А. М. Кожемякин, В. И. Юрченко.— 1996.— Б. И. № 21.

9. Воторопин С. Д., Носков В. Я. Автодинные ГИС на основе многослойных планарных диодов Ганна // Тр. конф. "СпiMiCo-2004".— Севастополь.— 2004.— С. 124—127.

10. Юрченко В. И., Воторопин С. Д. Генерирующие структуры в виде ГИС с элементами микромеханики // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2004.— № 1.— С. 7—10.

11. Васильев Н. А., Воторопин С. Д., Кожемякин А. М. и др. Исследование генераторных ГИС на диодах Ганна // Мат. межотрасл. НТК.— Горький.— 1984.— С. 39—41.

12. Воторопин С. Д. Активные ГИС КВЧ на планарных линиях передачи // V Междунар. НТК "Физика и технические приложения волновых процессов".— Самара.— 2001.— С. 16—17.

13. Воторопин С. Д. ГИС КВЧ на диодах Ганна // X Междунар. конф. "СпiMiCo-2000".— Севастополь.— 2000.— С. 141—142.

14. Разработка генераторных диодов для работы в диапазоне частот от 52,6 до 78,9 ГГц: Отчет по ОКР "Литавр-II" (НИИПП, г. Томск).— 1983.

15. Исследование путей повышения мощности генераторных диодов 6-миллиметрового диапазона длин волн: Отчет по НИР "Триада М" (НИИПП, г. Томск)— 1983.

16. Воторопин С. Д., Кожемякин А. М. Экспериментальное исследование генераторных модулей КВЧ на планарных линиях передачи // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ.— 1987.— Вып. 10.— С. 66—69.

17. Гудзь И. А., Ясинский В. К. Метод измерения теплового сопротивления лавинно-пролетных диодов // Там же.— 1984.— № 9.— С. 18—23.

18. Воторопин С. Д. Разработка микрополоскового импульсного генератора Ганна см диапазона длин волн: Отчет по ОКР "Токио-I" (НИИПП, г. Томск).— 1983.

19. Арефьев А. С., Коликов В. В., Неганов В. А. Собственные волны копланарного волновода // Физика волновых процессов и радиотехнические системы.— 1999.— Т. 2, № 3-4.— С. 13—17.

20. Неганов В. А., Нефедов Е. И., Яровой Г. П. Полосково-щелевые структуры сверх- и крайне высоких частот.— М.: Наука, 1996.

21. Rowe D. A., Lao B. Y. Numerical analysis of shielded coplanar waveguides // IEEE Trans.— 1983.— Vol. MTT-31, N 11.— P. 911—914.

22. Вайнштейн Л. А., Лесик Н. И., Кондратьев Б. В. Квазистатическая теория основной волны в щелевой линии // Радиотехника и электроника.— 1977.— Т. 22, № 9.— С. 1820—1828.

23. Curtice W. R., Purcell J. J. Analysis of the LSA mode including effects of charge and internally transfer time // IEEE Trans.— 1973.— Vol. ED-17, N 12.— P. 1048—1060.

24. А. с. 260641 СССР. СВЧ генератор / С. Д. Воторопин, А. М. Кожемякин.— 1987.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

16-я Международная Крымская Микроволновая Конференция СВЧ-ТЕХНИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 11-15 сентября 2006 года, г. Севастополь

16-я Международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии 11-15 сентября 2006г., Севастополь, Украина

КрымМуКо 2006 СпiMiCo

September 11-15, 2006, Sevastopol, Ukraine
16th International Crimea Conference "Microwave & Telecommunication Technology"

В РАМКАХ КОНФЕРЕНЦИИ ПЛАНИРУЕТСЯ ПРОВЕДЕНИЕ СЕМИНАРОВ

W1 — Сети беспроводного доступа (программа формируется Севастопольским филиалом Украинского государственного центра радиочастот и предприятием "Севастополь-информ", председатели — к. ф.-м. н. Каневский В. А. и к. т. н. Ермолов П. П., e-mail: yermolov@sinfo.net.ua);

W2 — Подготовка радиоинженеров и специалистов телекоммуникационного профиля (программа формируется Севастопольским национальным техническим университетом, председатель — проф. Слободянюк А. А., e-mail: ped@sevgtu.sebastopol.ua).

Рабочие языки конференции и семинаров — русский и английский

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

1. Твердотельные приборы и устройства СВЧ;
 - 1а. Моделирование и автоматизированное проектирование твердотельных приборов и устройств;
2. Электровакуумные и микровакуумные приборы СВЧ;
3. Системы СВЧ связи, вещания и навигации;
4. Антенны и антенные элементы;
 - 4а. Оптические технологии в антенной технике;
5. Пассивные компоненты;
 - 5а. Материалы и технология СВЧ-приборов;
 - 5б. Нанозлектроника и нанотехнологии;
6. СВЧ-электроника сверхбольших мощностей и эффекты;
7. СВЧ-измерения;
8. Прикладные аспекты СВЧ-техники;
 - 8а. СВЧ-техника в медицине и экологии;
9. Радиоастрономия, дистанционное зондирование и распространение радиоволн;
- Н. История СВЧ-техники и телекоммуникаций (доклады о юбилеях университетов, НИИ, КБ, журналов, исторических событиях, выдающихся ученых).

Тел./факс: +380-50-3931288
e-mail: crimico-2006@sinfo.net.ua
crimico-2006@mail.ru
<http://iee.orbita.ru/aps/crim06r.htm>
<http://www.crimico.org>

К. т. н. Б. А. ДЕМЬЯНЧУК

Украина, Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова
E-mail: badem@rambler.ruДата поступления в редакцию
13.12.2005 г.Оппонент д. т. н. В. И. СОЛОВЬЕВ
(Радиотехнический ин-т, г. Москва)

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНТЕНСИВНОСТИ МЕШАЮЩИХ СИГНАЛОВ В БЕЗЭХОВОЙ КАМЕРЕ ТУННЕЛЬНОГО ТИПА

Методом отношения правдоподобия получены значения вероятностей наблюдения суммы мешающих сигналов с заданным уровнем ее интенсивности в конкретной точке.

Точные (объективные) измерения эффективной площади рассеяния моделей объектов различной формы, так называемых радиолокационных портретов объектов, подлежащих распознаванию по сигналам весьма слабой интенсивности, тесно связаны с проблемами применения и качества безэховых камер, предназначенных для исключения мешающего влияния внешних электромагнитных полей от систем радио, телевидения и связи, а также влияния промышленных помех.

Погрешности таких измерений зависят также от степени совершенства самих безэховых камер, особенно камер туннельного типа с их переотражениями от боковых стенок. Указанные переотражения важно учитывать и при решении многих других задач в лабораториях и КБ промышленных предприятий, например, в процессе измерений характеристик направленности систем излучения и приема.

Методические приемы определения электродинамических характеристик суммарного (результатирующего) сигнала в безэховой камере прямоугольной формы изложены в работах [1, 2]. Применение этих приемов позволяет оценивать значение электромагнитного поля в заданной точке рабочего объема такой камеры, если отражающие характеристики бликующего ее участка и характеристики направленности излучателя точно известны. Принцип обустройства покрытий, ослабляющих отражения от металлических стенок, а также принципы взаимодействия полей со средой с потерями изложены в [3, с. 218—231].

Однако при применении камер туннельного типа с одной неотражающей, например передней, стенкой, даже при наличии точного согласования поперечных геометрических размеров основного лепестка диаграммы направленности с геометрическими размерами этой стенки, меры, которые исключили бы мешающие отражения, нуждаются в предварительном обосновании, т. к. приходится иметь дело с мешающими отражениями от четырех боковых стенок камеры по первому боковому лепестку диаграммы направленности излучателя в этой камере. Интенсивность меша-

ющего результирующего сигнала из-за интерференции четырех отраженных от стенок сигналов может оказаться максимальной, минимальной или некоторой средней по уровню, т. е., по существу, непредсказуемой — хотя бы потому, что свою лепту вносят здесь многочисленные дополнительно искажающие картину сигналы, переотраженные от ребер камеры, порождаемые множеством кроссполаризационных составляющих, случайным образом ориентированных в пространстве и не поддающихся объективному учету.

В связи с этим возникает практическая необходимость оценивания вероятностных показателей уровня указанной интенсивности. Между тем теоретические рекомендации решения этой задачи в известных публикациях в настоящее время отсутствуют — возможно, из-за весьма сложной процедуры ее корректного точного решения.

С целью составить представление о значениях вероятностей наблюдения суммы мешающих сигналов с заданным уровнем ее интенсивности в конкретной точке объема камеры ниже решается оригинальная задача статистического оценивания результатов интерференции сигналов в безэховой микроволновой камере прямоугольной формы туннельного типа при недостаточной концентрации поля, когда результирующий сигнал, например в центре неотражающей стенки камеры, складывается из суммы соизмеримых по величине сигналов, отраженных от боковых стенок камеры и стилизуемых, прежде всего, сдвигом по фазе.

Четыре разнесенных в пространстве почти параллельных луча, т. е. две пространственно разнесенных пары лучей, отраженные от четырех боковых стенок камеры, складываются в конкретной точке поверхности у неотражающей стенки, например в фазе или в противофазе. Именно эти крайние ситуации представляются здесь наиболее критичными, поскольку приводят к наибольшему уровню локальной неравномерности поля из-за мешающих переотражений.

Интерференционная картина поля в рассматриваемой камере из-за мешающих переотражений всегда является случайной, поскольку сигналы, отраженные от ее стенок, имеют случайную амплитуду и случайную начальную фазу, причем в каждой конкретной точке объема камеры интенсивность поля может оказаться какой-то средней между нулевой и максимальной по величине. Представляется полезным отыска-

ние послеопытных вероятностей появления каждой из трех возможных ситуаций:

1) все четыре мешающих сигнала от стенок камеры складываются в фазе, что соответствует наблюдению максимума;

2) одна пара сигналов от параллельных стенок камеры отличается от другой пары сигналов фазой, равной π , что характерно случаю наблюдения минимума;

3) три сигнала имеют одинаковую фазу, а четвертый имеет фазу, отличающуюся на π , что соответствует случаю наблюдения некоторого среднего уровня.

Считается, что эти три ситуации составляют полную группу событий. Решение задачи позволило бы составить представление о значениях вероятностей получения (в заданной точке камеры) поля с заданным уровнем его локальной неравномерности.

Сформулируем задачу, подлежащую решению.

Вывод функции правдоподобия для сигналов СВЧ-генератора, имеющих случайные фазы и амплитуды и вводимых в камеру с помощью излучателя в ее задней стенке, переотраженных от ее четырех стенок и оказавшихся в заданной точке противоположной неотражающей стенки камеры, где обычно осуществляются точные измерения поля, осуществим при следующих предположениях.

Полагаем, что генератор подключен к излучающему раскрыву, питающему камеру. С выходом излучателя связаны четыре парциальных луча и соответствующие им парциальные сигналы, переотраженные от четырех (попарно равноудаленных от центра излучения) металлических стенок камеры.

Интенсивности сигналов являются соизмеримыми. Сигналы с выхода излучателя после отражения от своей пары стенок могут складываться или вычитаться в зависимости от взаимного удаления и размеров стенок.

Каждый из двух каналов прохождения сигналов в камере в горизонтальной и вертикальной плоскостях добавляет к основному сигналу с его случайной амплитудой и фазой свою искажающую случайную по амплитуде и фазе составляющую. Эти искажающие составляющие считаются независимыми процессами.

Для определенности считается, что сигналы, попадающие в конкретную точку объема камеры, наблюдаются в полосе частот, равной Δf , на интервалах времени, равных T , т. е. имеем n независимых наблюдений в виде

$$(t_1 - T, t_1); (t_2 - T, t_2); \dots; (t_k - T, t_k); \dots; (t_n - T, t_n),$$

причем выполняются соотношения

$$\frac{1}{f} \ll T < \frac{1}{\Delta f}, (t_k - t_{k-1}) > \frac{1}{\Delta f}, k = \overline{1, n}.$$

Каждый из сигналов, прошедший по своему пути в камере, является узкополосным нормальным процессом с нулевым средним значением.

На небольшом интервале наблюдения T k -го интервала дискретизации вводимые в камеру сигналы, отраженные от попарно противоположных стенок камеры, с учетом собственных, также случайных, но

менее мощных (с амплитудами n_k, m_k) искажающих добавок в указанных двух каналах, для отмеченных выше условий имеют вид

$$x_{2k}(t) = s_{1k} \cos(2\pi ft + \psi_{1k}) + s_{2k} \cos(2\pi ft + \psi_{2k}) + n_k \cos(2\pi ft + \nu_k);$$

$$x_{3k}(t) = \lambda_1 s_{1k} \cos(2\pi ft + \psi_{1k}) + \lambda_2 s_{2k} \cos(2\pi ft + \psi_{2k}) + m_k \cos(2\pi ft + \mu_k), \quad (1)$$

где $s_{1k}(s_{2k})$ — распределенная по закону Рэлея огибающая сигнала с параметром $\rho_{r,1}^2(\rho_{r,2}^2)$, который равен мощности сигнала на выходе канала его распространения в заданную точку камеры;

$\psi_{1k}, \psi_{2k}, \nu_k, \mu_k$ — случайные начальные фазы сигналов, равномерно распределенные на интервале длительностью 2π ;

$n_k(m_k)$ — распределенная по закону Рэлея огибающая искажающей добавки с параметром $\sigma_n^2 = \sigma_m^2 = \sigma^2$;

λ_1, λ_2 — параметры, примерно равные единице, одинакового или противоположного знака, зависящие от длин путей, пройденных сигналами в камере, т. е. от взаимного удаления и соотношения размеров стенок камеры, а также от коэффициента отражения поля от этих стенок.

При применении функционала плотности вероятности с большим параметром α функция правдоподобия параметров $\lambda^T = (\lambda_1, \lambda_2)$ равняется

$$L(\lambda^T) = \left\langle \prod_{i=1}^n \lim_{\alpha \rightarrow \infty} \exp \left\{ -\frac{\alpha^2}{T} \int_{t_i-T}^{t_i} \begin{bmatrix} x_{2k} - s_{1k} \cos(2\pi ft + \psi_{1k}) \\ -s_{2k} \cos(2\pi ft + \psi_{2k}) \\ -n_k \cos(2\pi ft + \nu_k) \end{bmatrix}^2 dt \right\} \times \right. \\ \left. \times \exp \left\{ -\frac{\alpha^2}{T} \int_{t_i-T}^{t_i} \begin{bmatrix} x_{3k} - \lambda_1 s_{1k} \cos(2\pi ft + \psi_{1k}) \\ -\lambda_2 s_{2k} \cos(2\pi ft + \psi_{2k}) \\ -m_k \cos(2\pi ft + \mu_k) \end{bmatrix}^2 dt \right\} \right\rangle_{\theta^T}, \quad (2)$$

где $\theta^T = \{s_1^T, s_2^T, n^T, m^T, \nu^T, \mu^T, \psi_1^T, \psi_2^T\}$ — многомерный, т. е. $8n$ -мерный, вектор случайных параметров складывающихся сигналов, причем

$$s_1^T = (s_{11}, s_{12}, \dots, s_{1n}); \dots; \psi_2^T = (\psi_{21}, \psi_{22}, \dots, \psi_{2n});$$

$\langle \dots \rangle$ — означает статистическое усреднение по восьми n -мерным случайным векторам, т. е. по случайным величинам в количестве $8n$.

В силу независимости амплитуд и начальных фаз сигналов на соседних интервалах дискретизации (поскольку выбрано $T(\Delta f^{-1}; (t_k - t_{k-1}))\Delta f^{-1}$), среднее произведение сомножителей в (2) может быть заменено произведением их средних значений.

После алгебраических и тригонометрических преобразований выражений в квадратных скобках (2), возведенных в квадрат,

обозначив

$$X_{2k}^{\lambda} = \frac{1}{T} \int_{t_k-T}^{t_k} x_{2k} \cos 2\pi ft dt; X_{3k}^{\lambda} = \frac{1}{T} \int_{t_k-T}^{t_k} x_{3k} \cos 2\pi ft dt;$$

$$S_{1,2k}^{\cos} = S_{1k \sin}^{\cos} \psi_{1k} + S_{2k \sin}^{\cos} \psi_{2k};$$

$$S_{1,2k}^{\lambda} = \lambda_1 S_{1k \sin}^{\cos} \psi_{1k} + \lambda_2 S_{2k \sin}^{\cos} \psi_{2k}, \quad (3)$$

группируя составляющие, которые содержат случайные параметры искажающих сигналов, в результате последовательного усреднения (2) по случайным параметрам $\mu_k, \nu_k, m_k, n_k, \Psi_{1k}, S_{1k}, \Psi_{2k}, S_{2k}$ с учетом определений модифицированной функции Бесселя, γ -функции, функции Уиттекера и Φ -функции,

переходя к пределу при $\alpha \rightarrow \infty$ и применив обозначения

$$\begin{aligned} q_1 &= \frac{\rho_{c1}^2}{\sigma^2}; \quad q_2 = \frac{\rho_{c2}^2}{\sigma^2}; \quad A_{\Sigma}^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (X_{\Sigma k}^2 + X_{\Delta k}^2); \\ \bar{X} &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (X_{\Sigma k} X_{\Delta k} + X_{\Delta k} X_{\Sigma k}); \\ A_{\Delta}^2 &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (X_{\Sigma k}^2 + X_{\Delta k}^2). \end{aligned} \quad (4)$$

получим функцию правдоподобия в достаточно компактном виде:

$$\begin{aligned} L(\lambda_1, \lambda_2) &= \left[1 + q_1(1 + \lambda_1^2) + q_2(1 + \lambda_2^2) + q_1 q_2 (\lambda_1 - \lambda_2)^2 \right]^n \times \\ &\times \exp \left\{ \frac{2q_1}{1 + q_1(1 + \lambda_1^2)} \frac{n}{\sigma^2} (A_{\Sigma}^2 + 2\lambda_1 \bar{X} + \lambda_1^2 A_{\Delta}^2) \right\} \times \\ &\times \left[1 + q_2 \left((1 + \lambda_2^2) - \frac{q_1(1 + \lambda_1 \lambda_2)^2}{1 + q_1(1 + \lambda_1^2)} \right) \right]^{-1} \times \\ &\times \exp \left\{ 2q_2 \left[1 + q_2 \left((1 + \lambda_2^2) - \frac{q_1(1 + \lambda_1 \lambda_2)^2}{1 + q_1(1 + \lambda_1^2)} \right) \right]^{-1} \times \right. \\ &\times \left. \left[\frac{n}{\sigma^2} (A_{\Sigma}^2 + 2\lambda_2 \bar{X} + \lambda_2^2 A_{\Delta}^2) - \right. \right. \\ &- 2 \frac{q_1(1 + \lambda_1 \lambda_2)}{1 + q_1(1 + \lambda_1^2)} \frac{n}{\sigma^2} (A_{\Sigma}^2 + \lambda_1 \bar{X} + \lambda_2 \bar{X} + \lambda_1 \lambda_2 A_{\Delta}^2) + \\ &\left. \left. + \frac{q_1^2(1 + \lambda_1 \lambda_2)^2}{[1 + q_1(1 + \lambda_1^2)]^2} \frac{n}{\sigma^2} (A_{\Sigma}^2 + 2\lambda_1 \bar{X} + \lambda_1^2 A_{\Delta}^2) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (5)$$

В результате громоздких преобразований выражения (5) искомая функция правдоподобия принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} L(\lambda_1, \lambda_2) &= \left[1 + q_1 + q_2 + q_1 \lambda_1^2 + q_2 \lambda_2^2 + q_1 q_2 (\lambda_1 - \lambda_2)^2 \right]^n \times \\ &\times \exp \left\{ \frac{2n}{\sigma^2} \left[1 + q_1 + q_2 + q_1 \lambda_1^2 + q_2 \lambda_2^2 + q_1 q_2 (\lambda_1 - \lambda_2)^2 \right]^{-1} \times \right. \\ &\times A_{\Sigma}^2 \left[(q_1 + q_2 + q_1 q_2 (\lambda_1 - \lambda_2)^2) \right] + \\ &+ A_{\Delta}^2 (q_1 \lambda_1^2 + q_2 \lambda_2^2 + q_1 q_2 (\lambda_1 - \lambda_2)^2) + \\ &\left. + 2\bar{X} (q_1 \lambda_1 + q_2 \lambda_2) \right\}. \end{aligned} \quad (6)$$

где $A_{\Sigma}^2, A_{\Delta}^2$ — интенсивности мешающих пар сигналов, отраженных от боковых вертикальных и горизонтальных стенок микроволновой камеры;

\bar{X} — интенсивность результирующего сигнала интерференции двух пар сигналов — синфазных и противифазных;

q_i — отношение мощности отраженного от стенки и искажающего сигналов i -й пары, $i = 1, 2$.

В ситуации, обычно имеющей место на практике, справедливо считать, что $q_1 = q_2 = q; |\lambda_1| = |\lambda_2| = 1$. При этом функция правдоподобия (6) принимает вид

$$L(\lambda_1, \lambda_2) = \left[1 + 4q + q^2 (\lambda_1 - \lambda_2)^2 \right]^n \times$$

$$\times \exp \left\{ \frac{2n}{\sigma^2} \left[\frac{1 + 4q + q^2 (\lambda_1 - \lambda_2)^2}{1 + 4q + q^2 (\lambda_1 - \lambda_2)^2} \right]^{-1} \left[\begin{aligned} &A_{\Sigma}^2 (2q + q^2 (\lambda_1 - \lambda_2)^2) + \\ &+ A_{\Delta}^2 (2q + q^2 (\lambda_1 - \lambda_2)^2) + \\ &+ 2\bar{X} q (\lambda_1 + \lambda_2) \end{aligned} \right] \right\}. \quad (7)$$

Для рассматриваемой задачи наблюдения в заданной точке максимумов и минимумов электромагнитного поля применим обобщенный критерий отношения правдоподобия, когда крайние значения функции (7) сравниваются с ее средним по величине значением, которое, согласно (7) и исходным условиям, равняется

$$\begin{aligned} L(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = -1) &= \\ &= \frac{1}{(1 + 2q)^{2n}} \exp \left\{ \frac{2n}{\sigma^2} \frac{2q}{1 + 2q} [A_{\Sigma}^2 + A_{\Delta}^2] \right\}, \end{aligned} \quad (8)$$

где, согласно (1) и (4), в ситуации $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = -1$ имеем:

$$\begin{aligned} A_{\Sigma}^2 &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left[\left(\frac{1}{2} \int_{t_k - T}^{t_k} X_{\Sigma} \cos 2\pi f t \, dt \right)^2 + \right. \\ &+ \left. \left(\frac{1}{T} \int_{t_k - T}^{t_k} X_{\Sigma} \sin 2\pi f t \, dt \right)^2 \right] = \frac{1}{2} \left(\rho^2 + \frac{\sigma^2}{2} \right); \\ A_{\Delta}^2 &= \frac{1}{2} \left(\rho^2 + \frac{\sigma^2}{2} \right). \end{aligned}$$

В результате находим:

$$L(1; -1) = \frac{1}{(1 + 2g)^{2n}} \exp \{ 2nq \}. \quad (9)$$

Критерии для принятия решения о наблюдении максимумов и минимумов поля имеют вид

$$\begin{aligned} \max L(\lambda_1, \lambda_2) \\ \frac{\{\lambda_1, \lambda_2\} \neq \{1, -1\}}{L(1; -1)} > 1; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \min L(\lambda_1, \lambda_2) \\ \frac{\{\lambda_1, \lambda_2\} \neq \{1, -1\}}{L(1; -1)} < 1. \end{aligned} \quad (11)$$

Максимальное значение $L(\lambda_1, \lambda_2)$ в соответствии с (1) и (7) имеет место при $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$. При этом слагаемое \bar{X} перестает быть интерференционным членом и, согласно (4), примерно равняется A_{Σ}^2 , а $A_{\Delta}^2 = A_{\Sigma}^2$.

При этом, согласно (9), находим $\max L(\lambda_1, \lambda_2)$ в виде

$$\begin{aligned} \max L(\lambda_1, \lambda_2) &= L(1; 1) = \\ &= \frac{1}{(1+4q)^n} \exp\left\{ \frac{2n}{\sigma^2} \cdot \frac{2q}{1+4q} [A_z^2 + 2\bar{X} + A_\Delta^2] \right\} = \\ &= \frac{1}{(1+4q)^n} \exp\left\{ 4nq \frac{1+2q}{1+4q} \right\}. \end{aligned} \quad (12)$$

Подставляя (12) и (9) в (10), находим алгоритм для принятия решения о наблюдении максимума поля в заданной точке объема микроволновой камеры:

$$Z = \frac{(1+2q)^{2n}}{(1+4q)^n} \exp\left\{ n \frac{2q}{1+4q} \right\} > 1. \quad (13)$$

Минимальное значение $L(\lambda_1, \lambda_2)$, согласно (1), (4), (7), имеет место при $\lambda_1 = \lambda_2 = -1$. При этом, поскольку $A_\Delta^2 = A_z^2 = \bar{X}$, то

$$\min L(\lambda_1, \lambda_2) = L(-1, -1) = (1+4q)^{-n}. \quad (14)$$

Подставляя (14) и (9) в (11), получим алгоритм для принятия решения о наблюдении минимума поля в микроволновой камере:

$$Z = \frac{(1+2q)^{2n}}{(1+4q)^n} \exp\{-2nq\} < 1. \quad (15)$$

Считаем, что при отсутствии в камере максимума или минимума поля проекции рэлеевского вектора огибающей Z являются центрированными гауссовыми величинами с дисперсией, равной единице:

$$\sigma_z^2 = 1,$$

поскольку, согласно (13) и (15), единица является признаком нулевой гипотезы, а отличие дисперсии сигнала от единицы в одну или другую сторону является признаком наблюдения в камере неравномерности одного или другого вида.

При наблюдении в камере максимума поля проекции рэлеевского вектора огибающей сигнала, согласно (13), имеют дисперсию

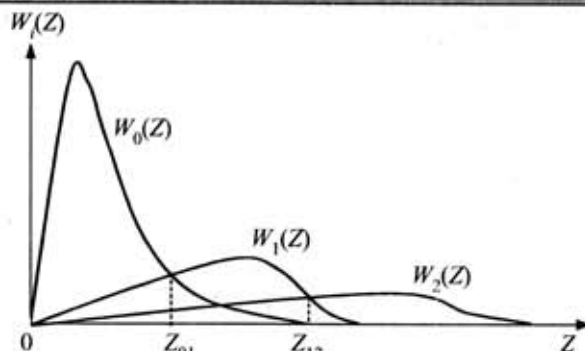
$$\sigma_{z_2}^2 = \frac{(1+2q)^{2n}}{(1+4q)^n} \exp\left\{ n \frac{2q}{1+4q} \right\}, \quad (16)$$

а при наблюдении минимума поля дисперсия проекции вектора огибающей, согласно (15), равняется

$$\sigma_{z_1}^2 = \frac{(1+2q)^{2n}}{(1+4q)^n} \exp\{-2nq\} \quad (17)$$

Следовательно, плотности вероятностей наблюдаемых огибающих сигналов для указанных трех случаев имеют вид:

$$\begin{aligned} w_1(z) &= \frac{z}{\sigma_{z_1}^2} \exp\left\{ -\frac{z^2}{2\sigma_{z_1}^2} \right\}, \quad \sigma_{z_1}^2 = 1; \\ w_2(z) &= \frac{z}{\sigma_{z_2}^2} \exp\left\{ -\frac{z^2}{2\sigma_{z_2}^2} \right\}, \quad \sigma_{z_2}^2 > 1; \\ w_0(z) &= \frac{z}{\sigma_{z_0}^2} \exp\left\{ -\frac{z^2}{2\sigma_{z_0}^2} \right\}, \quad \sigma_{z_0}^2 < 1. \end{aligned} \quad (18)$$



Плотности вероятностей наблюдения минимального, среднего и максимального уровней мешающих сигналов в безэховой камере туннельного типа

С целью принятия решений о факте наблюдения в камере заданного уровня мешающего сигнала, например, по критерию идеального наблюдателя, определим пороговые значения Z из соотношений (см. рисунок)

$$w_0(z_{01}) = w_1(z_{01}); \quad w_1(z_{12}) = w_2(z_{12}). \quad (19)$$

Подставляя (18) в (19), находим z_{01} и z_{12} в виде

$$z_{01} = \left[\frac{2\sigma_{z_0}^2 \cdot \ln \sigma_{z_0}^2}{\sigma_{z_0}^2 - 1} \right]^{1/2}; \quad (20)$$

$$z_{12} = \left[\frac{2\sigma_{z_2}^2 \cdot \ln \sigma_{z_2}^2}{\sigma_{z_2}^2 - 1} \right]^{1/2}. \quad (21)$$

Приведем примеры, иллюстрирующие зависимость дисперсий законов распределения наблюдаемых уровней поля и, следовательно, пороговых уровней (20) и (21) от соотношения между интенсивностями основного мешающего сигнала в камере и искажающих этот сигнал переотражений, например, от ребер безэховой камеры туннельного типа:

а) $q = \frac{\rho^2}{\sigma^2} = 1; \quad n=3.$

Дисперсии проекций вектора огибающей мешающего сигнала, согласно (16) и (17), равняются: при наблюдении минимума

$$\sigma_{z_0}^2 = \frac{(1+2 \cdot 1)^{2 \cdot 3}}{(1+4 \cdot 1)^3} \exp\{-2 \cdot 3 \cdot 1\} = 0,0145; \quad \sigma_{z_0} = 0,12;$$

при наблюдении среднего значения

$$\sigma_{z_1}^2 = 1; \quad \sigma_{z_1} = 1;$$

при наблюдении максимума

$$\sigma_{z_2}^2 = \frac{(1+2 \cdot 1)^{2 \cdot 3}}{(1+4 \cdot 1)^3} \exp\left\{ 3 \frac{2 \cdot 1}{1+4 \cdot 1} \right\} = 19,36; \quad \sigma_{z_2} = 4,4.$$

Пороговые уровни, согласно (20), (21), имеют вид

$$z_{12} = \left[\frac{2 \cdot 19,36 \ln 19,36}{19,36 - 1} \right]^{1/2} = 2,5;$$

$$z_{01} = \left[\frac{2 \cdot 0,0145 \ln 0,0145}{0,0145 - 1} \right]^{1/2} = 0,35.$$

б) $q=2; n=3$.

$$\sigma_{z_0}^2 = \frac{(1+2 \cdot 2)^{2 \cdot 3}}{(1+4 \cdot 2)^3} \exp\{-2 \cdot 3 \cdot 2\} = 10^{-4}; \sigma_{z_0} = 10^{-2};$$

$$\sigma_{z_4}^2 = 1; \sigma_{z_4} = 1;$$

$$\sigma_{z_1}^2 = \frac{(1+2 \cdot 2)^{2 \cdot 3}}{(1+4 \cdot 2)^3} \exp\left\{3 \frac{2 \cdot 2}{1+4 \cdot 2}\right\} = 45,3; \sigma_{z_1} = 6,73;$$

$$z_{12} = \sqrt{\frac{2 \cdot 45,3 \cdot 1,46}{45,3 - 1}} = 1,73;$$

$$z_{01} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,0001 \cdot (-9,2)}{0,0001 - 1}} = 0,04.$$

Эти примеры показывают естественное усиление различимости наблюдаемых мешающих уровней поля в камере при уменьшении интенсивности искажающих сигналов.

Теперь, когда известны плотности вероятностей наблюдаемых искомым уровней сигналов, установлены критерии принятия решений, пороговые уровни для применения решающих правил, определим вероятность наличия минимального, максимального или некоторого среднего уровней поля в заданной наблюдаемой точке камеры, если априорные значения вероятностей указанных событий считаются одинаковыми.

Апостериорная вероятность наблюдения минимального уровня мешающего сигнала равняется

$$P_{\min} = \frac{1}{3} \int_0^{z_{01}} \frac{z}{\sigma_{z_0}^2} \exp\left\{-\frac{z^2}{2\sigma_{z_0}^2}\right\} dz = \frac{1}{3} \left[1 - \exp\left\{-\frac{z_{01}^2}{2\sigma_{z_0}^2}\right\}\right]. \quad (22)$$

Вероятность наблюдения максимального уровня наблюдаемого сигнала имеет вид

$$P_{\max} = \frac{1}{3} \int_{z_{12}}^{\infty} \frac{z}{\sigma_{z_1}^2} \exp\left\{-\frac{z^2}{2\sigma_{z_1}^2}\right\} dz = \frac{1}{3} \exp\left\{-\frac{z_{12}^2}{2\sigma_{z_1}^2}\right\}. \quad (23)$$

Вероятность наблюдения некоторого среднего уровня поля, согласно (18), равняется

$$P_{\text{cp}} = \frac{1}{3} \int_{z_{01}}^{z_{12}} \frac{z}{\sigma_{z_1}^2} \exp\left\{-\frac{z^2}{2\sigma_{z_1}^2}\right\} dz = \frac{1}{3} \int_{z_{01}}^{z_{12}} z \exp\left\{-\frac{1}{2} z^2\right\} dz = \frac{1}{3} \left[\exp\left\{-\frac{z_{01}^2}{2}\right\} - \exp\left\{-\frac{z_{12}^2}{2}\right\}\right]. \quad (24)$$

Вычисляя статические показатели уровня мешающего поля в камере для условий приведенного примера согласно, (22), (23), (24), получим

а) $q=1; n=3: P_{\max}=0,328; P_{\min}=0,284; P_{\text{cp}}=0,326$.

б) $q=2; n=3: P_{\max}=0,323; P_{\min}=0,333; P_{\text{cp}}=0,258$.

Таким образом, при недостаточной концентрации поля в безэховой камере туннельного типа и известном отношении мощностей мешающих сигналов, излучаемых в направлении боковых лепестков диаграммы направленности, к мощности шумовых искажающих измерения сигналов, возможно оценивание по предлагаемой методике вероятностей наблюдения минимальных, максимальных и некоторых промежуточных уровней мешающих сигналов в следующей последовательности.

1) Оцениваются минимальный и максимальный уровни мощности смеси мешающих и искажающих сигналов в исследуемой точке камеры по множеству равных интервалов наблюдения.

2) Вычисляются значения пороговых уровней, устанавливаемых по критерию идеального наблюдателя по формулам (19), (20).

3) Определяются послеопытные вероятности наблюдения конкретных уровней мешающих сигналов в соответствии с формулами (22) — (24).

Пример вычисления этих вероятностей показывает, что при увеличении в 2 раза уровня искажающих сигналов вероятность наблюдения в заданной точке некоторого среднего уровня мешающих сигналов увеличивается в 1,3 раза. Отсюда следует целесообразность обустройства радиопоглощающими материалами не только передней стенки, но и ребер безэховой камеры туннельного типа.

В заключение отметим, что имея распределения (см. рисунок) уровней мешающих сигналов при наличии искажающих, несложно оценить погрешности оценивания величин апостериорных вероятностей наблюдения тех или иных уровней искажающих сигналов по рассмотренным формулам. Поэтому ограничимся здесь проверенным утверждением о том, что относительные ошибки оценивания величин этих апостериорных вероятностей реально не превышают единиц процентов.

Предлагаемая методика открывает возможности оценивания доверительных интервалов для результатов измерений, получаемых в безэховых камерах, например, при приеме сигналов, отраженных от малоразмерных объектов.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Мицмакер М. Ю., Торгованов В. А. Безэховые камеры СВЧ. — М.: Радио и связь, 1982.
2. Алимин Б. Ф. Техника расчета отражения и рассеяния от поглотителей электромагнитных волн. Обзор // Зарубежная радиоэлектроника. — 1977. — № 3. — С. 128—151.
3. Демьянчук Б. А. Принципы и применения микроволнового нагрева. — Одесса: Черноморье, 2004.

А. И. ВОРОБЕЦ, к. ф.-м. н. Г. И. ВОРОБЕЦ,
д. ф.-м. н. С. В. МЕЛЬНИЧУК

Украина, Черновицкий национальный университет им. Юрия Федьковича
E-mail: vgeorge@chnu.cv.ua

Дата поступления в редакцию
10.11.2005 г.
Оппонент В. Г. ЮРЬЕВ
(ЦКБ "Ритм", г. Черновцы)

ОПТИМИЗАЦИЯ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ СПЕКТРОФОТОМЕТРА СФ-20

Относительная погрешность электронного тракта измерения оптических параметров < 0,025%; время полного цикла измерения оптического спектра пропускания в диапазоне 0,19...2,5 мкм не превышает 20 мин.

Спектрофотометр СФ-20 предназначен для измерения коэффициента пропускания и оптической плотности химических растворов и кристаллических сред в диапазоне длин волн 0,185...2,5 мкм. В приборе используется двухлучевая оптическая схема измерений, которая состоит из опорного и измерительного оптических каналов и позволяет учитывать оптическое пропускание атмосферы в исследуемом волновом диапазоне. Незначительная модернизация механической части измерительного канала позволяет практически одновременно измерять как спектры пропускания, так и отражения. Эти особенности данного прибора обеспечивают уникальные возможности для его применения при комплексном исследовании параметров полупроводниковых соединений A^2B^6 , A^3B^5 и барьерных структур на их основе, используемых в качестве элементов волоконно-оптических систем связи с низкими потерями и большой шириной полосы пропускания в диапазоне 0,4...1,8 мкм [1].

Предложенное в [2] устройство сопряжения позволяет полностью автоматизировать процесс измерений при подключении СФ-20 к IBM PC. Однако практическая эксплуатация устройства сопряжения показывает, что отдельные функции, предусмотренные схемотехническим и программным решением, хотя и расширяют возможности управления прибором, но используются крайне редко. Так, практически не используются переключатели скорости развертки спектра и прокрутки бумаги встроенного самописца. Калибровку по стопроцентной линии пропускания, режимы «многократного» измерения спектра и быстрой «прокрутки» спектрального диапазона можно эффективнее реализовать, используя исключительно коммутацию кнопок запуска прямого, обратного хода и остановки развертки спектра при непрерывном измерении текущего значения длины волны. Аналогично на уровне управляющего программного обеспечения реализован режим поиска и установки начального значения длины волны измеряемого спектрального диапазона.

Поэтому целью данной работы была оптимизация аппаратно-программного обеспечения для упрощения схемотехнического решения устройства сопряжения и повышения точности измерений.

Для измерения аналоговых сигналов длины волны λ , коэффициентов оптического пропускания T и поглощения D в приборе использованы встроенные механические преобразователи угла поворота движка резистивного делителя в соответствующие значения сопротивления и напряжения. Номинальные значения сопротивлений резистивных делителей для трех диапазонов λ ($\lambda_1=186...340$ нм, $\lambda_2=340...800$ нм, $\lambda_3=800...2500$ нм) составляют 10 кОм и для оптических параметров — 4 кОм. Для их питания целесообразно использовать источник постоянного напряжения $U_0=5$ В. Это позволяет согласовать величину измеряемого сигнала с динамическим диапазоном 12-разрядного аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) последовательного типа ADS7822P. Чувствительность входного каскада данного АЦП оказывается достаточной для прямого измерения сигналов λ и T в различных диапазонах без применения дополнительных усилительных каскадов.

Согласно численным оценкам, в первом волновом диапазоне изменение λ_1 составляет $\Delta\lambda_1=\lambda_{\max}-\lambda_{\min}=154$ нм. Разрешающая способность резистивного делителя $R_1=10$ кОм в этом диапазоне составит $\delta_{R_1}=R_1/\Delta\lambda_1=64,94$ Ом/нм, что соответствует чувствительности по напряжению $\delta_{U_1}=U_0/\Delta\lambda_1=32,5$ мВ/нм. Учитывая, что диапазон измеряемых напряжений используемого АЦП также составляет 5 В, а точность преобразования ограничена половиной значения младшего разряда [3, 4], то погрешность АЦП при измерении напряжения находится в пределах $\Delta_{\text{АЦП}}=\pm 0,6$ мВ. Полученное значение теоретически обеспечивает абсолютную погрешность в измерении λ_1 не хуже $\Delta_1=0,037$ нм. В то же время погрешность используемого в приборе механического датчика λ составляет $\Delta_{M1}=\pm 0,1$ нм. Для второго (λ_2) и третьего (λ_3) диапазонов, а также для коэффициента пропускания T ($\Delta T=1...100\%$) соответственно получим значения $\delta_{U_2}=10,9$ мВ/нм, $\Delta_2=0,11$ нм; $\delta_{U_3}=2,9$ мВ/нм, $\Delta_3=0,4$ нм; $\delta_{U_T}=0,05$ В/%, не уступающие соответствующим техническим характеристикам прибора ($\Delta_{M2}=\pm 0,2$ нм, $\Delta_{M3}=\pm 0,4$ нм). При этом относительная погрешность во всех случаях в середине измерительного диапазона составляет $\epsilon=0,024\%$.

Для повышения точности измерений λ можно использовать АЦП большей разрядности [3]. Однако в этом нет необходимости, поскольку гистерезис изменения сопротивления механического датчика вследствие износа может составлять $\Delta_R = 20 \dots 30$ Ом, что соответствует ошибке по Δ_M приблизительно 2 нм. В процентном отношении для третьего диапазона это составляет 0,12%.

Погрешность динамических измерений определяется рабочей тактовой частотой f_T АЦП. В данном случае она составляет $f_c = 75$ кГц. Частота выборки аналогового сигнала для 12-разрядного АЦП при этом теоретически может достигать более 6 кГц. При минимальной скорости развертки спектра $v_{\min} = 0,5$ нм/мин можно произвести $7,5 \cdot 10^5$ измерений λ на интервале $\Delta\lambda = 1$ нм. Погрешность метода в этом случае составляет $\Delta\lambda_{\min} = 1,33 \cdot 10^{-6}$ нм. Для максимальной скорости развертки $v_{\max} = 128$ нм/мин получим $\Delta\lambda_{\max} = 0,34 \cdot 10^{-3}$ нм.

Учитывая приведенные оценки, оптимизированная функциональная схема устройства сопряжения может состоять из наиболее упрощенных блоков измерения аналоговых сигналов и управления силовыми приводами прибора (рис. 1). Измерительный блок включает АЦП (ADC) и коммутатор входных сигналов (MUX) на интегральной схеме (ИС) ADG608 (аналог ИС

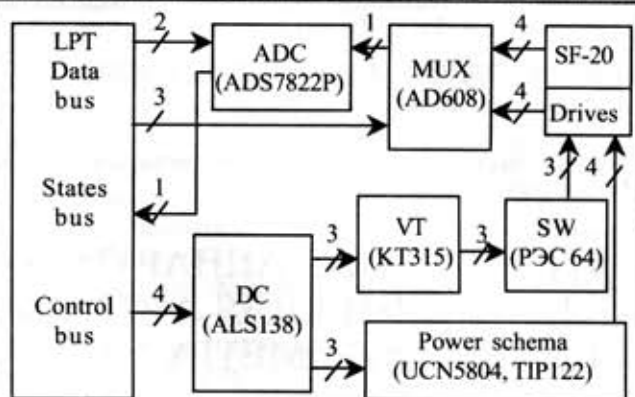


Рис. 1. Функциональная схема устройства сопряжения спектрофотометра СФ-20 с компьютером К561КП2). Управление измерительной частью осуществляется по шине данных (Data bus) LPT-порта. При этом младшие два бита используются для инициализации и подачи тактовых импульсов на АЦП, а следующие три бита — для дешифрации входов коммутатора. Цифровой сигнал с АЦП вводится в компьютер по одной сигнальной линии шины состояний (States bus) LPT-порта.

Силовая часть включает блок управления реле ПЭС-64, предназначенных для коммутации ключей

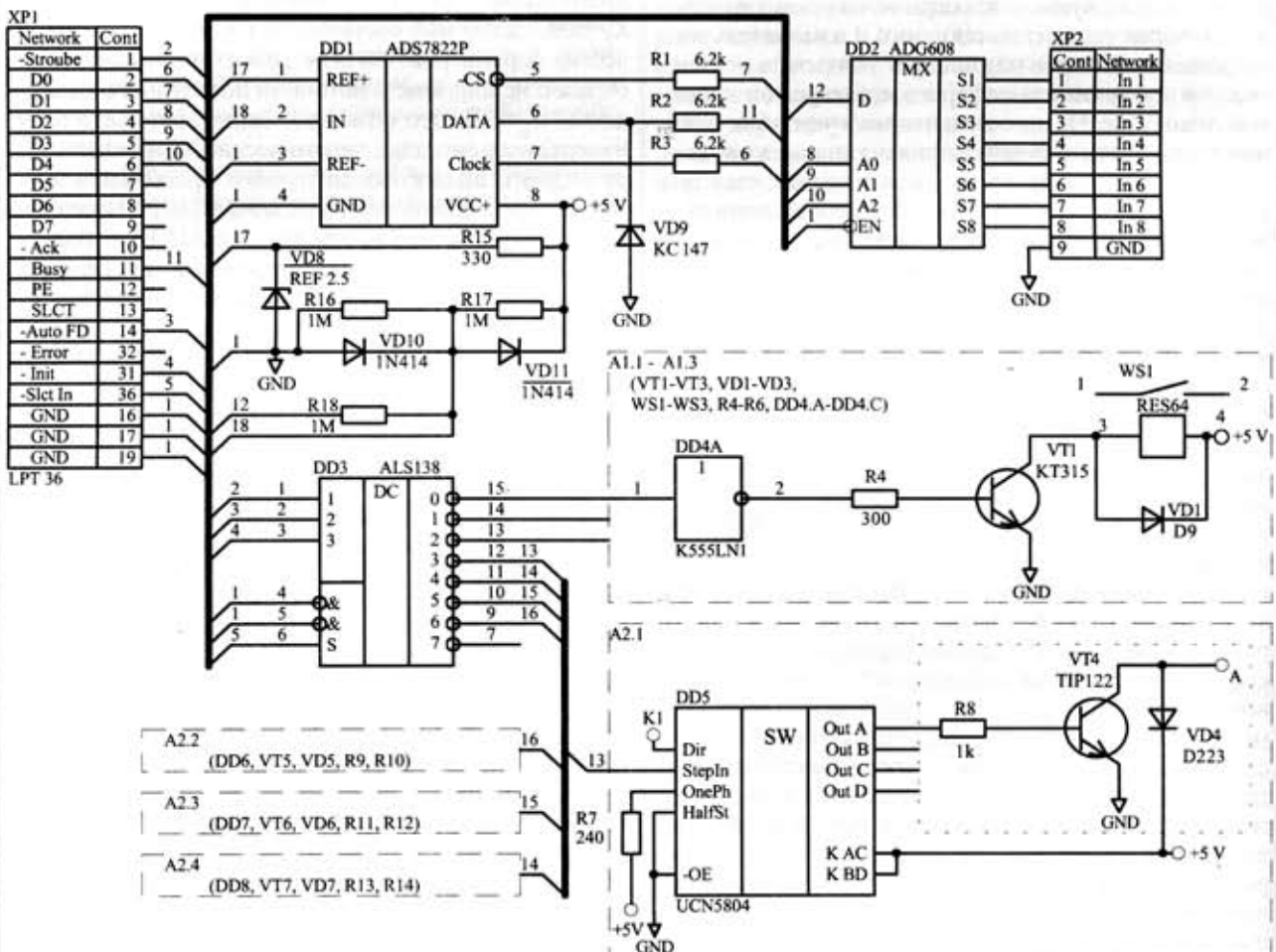


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема устройства сопряжения:

DD1 — ADS7822P; DD2 — ADG608; DD3 — ALS138; DD4 — ALS04; DD5 — DD8 — UCN5804; VT1-VT3 — KT315Г; VT4-V7 — TIP122; VD1-VD3 — D9; VD4-VD7 — D223; WS1, WS2 — ПЭС64; WS3 — ПЭС55; VD8 — REF2.5; VD9 — KC147; VD10, VD11 — 1N414

Условия измерения оптических параметров в разных волновых диапазонах спектрофотометра

Волновой диапазон λ , нм	Порядок дифракции	Дифракционная решетка	Источник излучения	Фотоприемник
190—340	II	Ф	Д	ФЭУ
340—800	I	Ф	Н	ФЭУ
800—2500	I	К	Н	ФС

прямого хода, остановки и обратного хода развертки спектра, а также блок управления двигателями (Power schema) для коммутации источника (дейтериевой — Д, или накальной — Н лампы (см. таблицу)) и приемника лучистой энергии (фотоэлектронного умножителя — ФЭУ или фотосопротивления — ФС), а также для изменения типа дифракционной решетки (Ф, К) и шкалы порядка дифракции (I, II).

Управление силовой частью реализовано по четырем сигнальным линиям шины управления (Control bus) LPT-порта [4] (рис. 2). Дешифрация ключевых транзисторных элементов осуществляется с помощью ИС ALS138 (аналог К1533ИД7). Схемотехническая реализация силового привода зависит от типа используемых электродвигателей (Drives) [5]. Режимы коммутации фаз шаговых двигателей можно формировать специализированными ИС UCN5804 или MC3479, а необходимая выходная мощность каскада обеспечивается силовыми ключами TIP122 или LU024N. Коммутация сигнала управления Dir ИС UCN5804 для изменения направления вращения двигателей (вход K1 на DD5, рис. 2) осуществляется с помощью концевых выключателей при двух крайних фиксированных положениях якоря двигателя. Поэтому кроме четырех аналоговых сигналов с СФ-20 на АЦП через мультиплексор дополнительно коммутируются четыре логических сигнала с концевых выключателей (рис. 1).

Общий алгоритм считывания и обработки данных с LPT-порта следующий:

1. Выбор начальных параметров эксперимента: начального и конечного значения λ исследуемого волнового диапазона и типа измеряемой оптической постоянной — пропускания T или оптической плотности D . Открытие файла *.dat для записи данных измерений.
2. Автоматическая установка исходного состояния измерительной системы по результатам анализа исходных параметров датчиков контроля λ согласно таблице.
3. Автоматический запуск измерений с записью данных в файл *.dat и выводом результатов в графическом интерфейсе пользователя в режиме реального времени.
4. Остановка процесса сканирования и закрытие файла данных при достижении граничного значения λ с переходом в диалоговый режим опроса управляющей программы на дальнейшую обработку полученных результатов или проведение нового цикла измерений.

Измеренные спектры пропускания, которые демонстрируют реальные возможности применения предложенного аппаратно-программного обеспечения для различных веществ, показаны на рис. 3. Хотя волно-

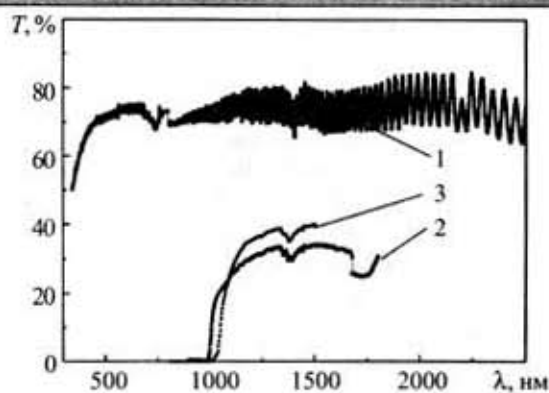


Рис. 3. Спектры пропускания: 1 — слюда; 2 — CdTe; 3 — n-Si

вая чувствительность прибора $\delta\lambda$, и уменьшается с возрастанием λ , однако является достаточной, чтобы выявить интерференционные особенности спектра пропускания слюды в длинноволновой области (рис. 3, график 1). Вычисленные по волновому краю поглощения значения ширины запрещенной зоны для CdTe ($E_g=1,65$ эВ) и n-Si ($E_g=1,12$ эВ) согласуются с литературными данными.

В общем случае резистивные делители, используемые в качестве преобразователей типа “сопротивление — напряжение — длина волны”, характеризуются достаточно высокой линейностью зависимости $\lambda(U)$. Поэтому реальное значение длины волны $\lambda(U)$, измеряемой АЦП, хорошо аппроксимируется прямо пропорциональной зависимостью

$$\lambda(U) = \lambda_{\min} + (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) \frac{(U_{\lambda} - U_{\min})}{(U_{\max} - U_{\min})},$$

где длины волн λ_{\max} , λ_{\min} и соответствующие им напряжения U_{\max} , U_{\min} , снимаемые с преобразователей, определяются экспериментально по шкале механического счетчика откалиброванного прибора и показаниям цифрового вольтметра при максимальном и минимальном сопротивлении резистивного преобразователя для соответствующего волнового диапазона; U_{λ} — мгновенное значение напряжения на резистивном преобразователе, соответствующее текущему значению измеряемой длины волны.

Аналогичное соотношение используется и для расчета измеряемого значения оптических параметров.

При значительном отклонении от линейности зависимости $\lambda(U)$ можно использовать режим сопровождения спектра реперными метками [2]. Однако более оптимальным является введение в программу управления и обработки соответствующей калибровочной кривой.

Существенное влияние на точность измерений, а главное — на стабильность работы устройства сопряжения, проявляет “дребезг контактов” резистивных преобразователей. Статистический анализ результатов экспериментальных измерений показывает, что проникновение в измерительный канал АЦП сигналов на уровне 2—30 мВ приводит к ошибке определения λ на уровне 0,1—1,0 нм. Такие помехи можно эффективно отфильтровать — как схемотехнически, так и программно, используя статистическую обработку и цифровую фильтрацию результатов измерений. Грубые “промахи” измерений, обусловленные

сигналами "дребезга" до 80—100 мВ, проявляются в виде отклонений λ на несколько десятков нанометров и могут приводить даже к ложной автоматической перекоммутации текущего исследуемого волнового диапазона. Частота появлений таких сигналов в процессе измерений, как правило, не превышает значений 1:50—1:100. Их фильтрация осуществляется программно с помощью логического оператора

$If ((a) > (as + N)) \text{ or } ((a) < (as - N)) \text{ then } A \text{ else } as = a.$

Здесь a , as — соответственно текущее и предыдущее значения измеряемой величины λ ; N — задаваемый параметр фильтрации (обычно $N = 2 \dots 3$ нм); A — процедура аналогово-цифрового преобразования, измерения и приведения к нормированной шкале измеряемой величины.

Значительного повышения точности измерений и уменьшения погрешностей, обусловленных использованием механических преобразователей в кинематической схеме прибора, можно достичь, заменив резистивные делители оптронными датчиками с открытым оптическим каналом. Однако, как показано в [2, 3], для расчетных соотношений, графического отображения и интерпретации физических результатов исследуемых характеристик полупроводниковых материалов и структур вполне достаточно достигнутой точности измерений.

Программное обеспечение для управления прибором и обработки результатов измерений может быть выполнено на любом языке программирования вы-

сокого уровня и определяется возможностями используемого компьютера и операционной системы (ОС). Оптимальным вариантом является Borland Pascal с ОС Windows 9x, что допускает прямое обращение к портам ввода-вывода на программном уровне.

Таким образом, разработанный вариант оптимизированной принципиальной схемы устройства сопряжения и программного обеспечения с двойной фильтрацией сигналов на программном уровне обеспечивает относительную погрешность электронного измерительного тракта не более 0,025%. Время одного полного цикла измерений оптического спектра в диапазоне от 0,19 до 2,5 мкм и автоматической обработки результатов не превышает 20 минут.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Optical and infrared detectors / Ed. by R. J. Keyes. — Berlin—Heidelberg—New York: Springer-Verlag, 1980.
2. Воробець Г. І., Воробець О. І., Воропаєв С. Л., Горлей П. М. Пристрій для автоматизації оптичних досліджень бар'єрних структур на основі напівпровідникових сполук A^2B^6 , A^3B^5 // Вісник Київськ. нац. ун-ту ім. Т. Шевченка. Фізика. — 2004. — Вип. 6. — С. 40—42.
3. Воробець Г. І., Воробець О. І., Горлей П. М. Шістнадцятирозрядний аналогово-цифровий перетворювач сигналів для шини ISA IBM PC // Наук. вісник Чернівецьк. ун-ту. Фізика. Електроніка. — 2002. — Вип. 133. — С. 109—112.
4. Гук М. Аппаратные средства IBM PC. Энциклопедия. — С.-Петербург: Питер, 2001.
5. Ан П. Сопряжение ПК с внешними устройствами. — М.: ДМК Пресс, 2004.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Эггинс Б. Химические и биологические сенсоры. — М.: Техносфера, 2005. — 336 с.

Первое учебное пособие в новой области на стыке аналитической химии, электроники, физики и медицины. Особенно подробно описаны электрохимические, оптические, гравиметрические, температурные сенсоры, распознавание ионов и молекул, «лаборатории-на-чипе». Пособие предназначено для студентов и специалистов в областях медицинских и биотехнологий, пищевой промышленности и контроля окружающей среды, микробиологов, специалистов, разрабатывающих и применяющих микроаналитические системы.



в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

- Формирование нелинейного сигнала при воздействии на материальные объекты в целях передачи информации. (Россия, г. Воронеж)
- Зависимость сопротивления металлических квантовых проводов от температуры. (Россия, г. Москва)
- Современная инфракрасная термографическая технология, используемая при профилактическом обслуживании оборудования. (Сербия и Черногория, г. Бор)
- Высокостабильный СВЧ генераторный модуль для быстродействующих распределенных информационно-управляющих систем. (Украина, г. Днепропетровск)
- Технологические источники ионов на основе контрагированных разрядов. (Россия, г. Рубежное)
- Исследование влияния легирующих добавок на теплостойкость, теплопередачу никелевых покрытий корпусов ИС. (Украина, г. Ивано-Франковск)
- Компьютерная система анализа случайных потоков шумовых импульсов кремниевых диодов с микроплазмами. (Беларусь, г. Минск)
- О механизме насыщения тока стока полевого транзистора. (Узбекистан, г. Ташкент)
- Разброс параметров полевых транзисторов с барьером Шоттки на GaAs. (Украина, г. Днепропетровск)

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

К. ф.-м. н. А. В. РЫБКА, А. А. ЗАХАРЧЕНКО, к. ф.-м. н. Л. Н. ДАВЫДОВ,
И. Н. ШЛЯХОВ, А. А. БЛИНКИН, К. В. КУТНИЙ

Украина, ННЦ "Харьковский физико-технический институт"
E-mail: rybka@kipt.kharkov.ua

Дата поступления в редакцию
13.12.2005 г.

Оппонент д. т. н. В. К. КОМАРЬ
(Ин-т монокристаллов, г. Харьков)

СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ CdZnTe ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

На основе CdZnTe можно с успехом создавать дозиметрические и спектрометрические измерительные приборы, работающие при комнатной (и близких к ней) температуре.

Дозиметрические и спектрометрические приборы с сенсорами из полупроводниковых кристаллов CdZnTe (CdTe) в последнее время находят все более широкое применение при регистрации ионизирующего излучения, как рентгеновского, так и гамма-излучения [1]. Благодаря широкой запрещенной зоне (1,6 эВ для CdZnTe) и совершенствованию технологии производства создаются кристаллы с необходимыми, а в некоторых случаях уникальными, физическими свойствами, что позволяет получать на их основе блоки детектирования с хорошими спектрометрическими и эксплуатационными характеристиками. Они отличаются высокой эффективностью регистрации излучения, хорошим соотношением сигнал/шум и энергетическим разрешением при комнатной температуре. Линейность в счетном и токовом режимах работы в широком диапазоне измеряемой мощности дозы и высокая радиационная стойкость CdZnTe [2] позволяют использовать его при производстве дозиметрических блоков с высоким радиационным ресурсом, в частности, для работы в радиационных полях большой интенсивности. Это определяет все более перспективное использование сенсоров на основе CdZnTe (CdTe) как в системах дозиметрического контроля (например, на АЭС, на предприятиях по производству и переработке ядерного топлива, при экологическом контроле), так и в спектрометрических системах (например, для анализа радиоактивных отходов, в ядерно-физических методах элементного анализа и др.).

В настоящей работе приведены результаты испытаний двух блоков детектирования — рентгеновского дозиметра, который в токовом режиме способен работать в широком диапазоне мощности экспозиционных доз, и рентгеновского спектрометра. Используемые в них сенсоры из CdZnTe, в отличие от традиционно используемых полупроводниковых сенсоров, не требуют криогенного охлаждения.

Контроль мощности дозы рентгеновского излучения

Для измерения большой мощности экспозиционной дозы рентгеновского излучения был разработан

и создан блок детектирования (БД), который работает в токовом (аналоговом) режиме. Такой БД включает в себя сенсор из CdZnTe и преобразователь "ток—напряжение" (рис. 1). Измерительный тракт, кроме БД, содержит еще блок нормирующих усилителей, универсальный вольтметр и блок питания (на рисунке не показаны). БД может при необходимости помещаться на удалении от блока нормирующих усилителей, будучи соединенным с ним кабельным каналом связи.



Рис. 1. Блок детектирования для контроля мощности дозы рентгеновского излучения

В аналоговом режиме работы ток, возникающий в результате воздействия кванта излучения на сенсор, поступает на преобразователь "ток—напряжение" с коэффициентом преобразования ≈ 1 мкА/В. На выходе прибора возникает напряжение, пропорциональное мощности экспозиционной дозы (МЭД). Как показали испытания, сигналы сенсора можно передавать по кабельным каналам связи на расстояния до 50 м.

С целью выяснения работоспособности сенсора из CdZnTe в рентгеновских полях высокой интенсивности с помощью описываемого блока детектирования были проведены измерения МЭД на технологической рентгеновской установке (трубка с молибденовым анодом). Для этого в корпусе БД было сделано специальное окно из бериллиевой фольги. Это позволило регистрировать рентгеновское излучение в диапазоне энергий, начиная с ≈ 5 кэВ.

На подготовительном этапе работы была проведена калибровка технологической рентгеновской установки ДРОН-4 для измерения МЭД в зависимости от режима работы рентгеновской трубки. В дальнейшем установка служила источником рентгеновского излучения при испытании БД. Калибровка проводилась поверенным медицинским дозиметром фирмы VEB RFT 27 012 в точке, удаленной на 150 мм от источ-

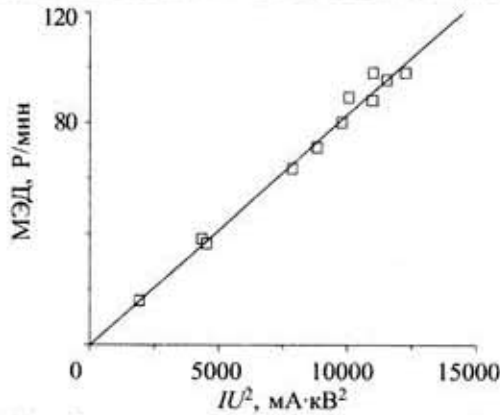


Рис. 2. Калибровочная зависимость рентгеновской установки, полученная с помощью дозиметра RFT 27 012 ника (рис. 2). Полная мощность излучения (W_p) непрерывного рентгеновского спектра определялась как [3, с. 11]

$$W_p = kZIU^2,$$

где k — калибровочная постоянная;
 Z — атомный номер материала анода;
 I — ток, протекающий через рентгеновскую трубку;
 U — напряжение на трубке.

Отсюда следует пропорциональность МЭД произведению $I \cdot U^2$.

Калибровочная зависимость на рис. 2 позволяет определить коэффициент пропорциональности, равный $kZ=0,0083$ (Р/мин)/(МА·КВ²) для пересчета произведения IU^2 на рентгеновской трубке в мощность экспозиционной дозы ($Z_{Mo}=42$).

Зависимость от МЭД величины тока, создаваемого БД для контроля мощности дозы с сенсором из CdZnTe, представлена на рис. 3 для разных значений напряжения смещения. Видно, что эта зависимость имеет линейный характер.

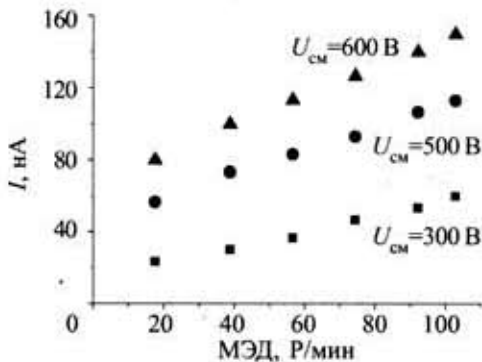


Рис. 3. Дозовая зависимость тока в блоке детектирования для контроля мощности дозы с сенсором из CdZnTe при разных напряжениях смещения

Для сравнения на рис. 4 показана аналогичная зависимость описываемого БД, в котором вместо сенсора из CdZnTe был установлен сенсор из CdTe. Эту зависимость также с достаточной точностью можно считать линейной. Основное отличие в том, что сенсор из CdZnTe вырабатывает при той же МЭД меньший ток, что коррелирует с его более высоким удельным сопротивлением. Это позволяет БД с CdZnTe

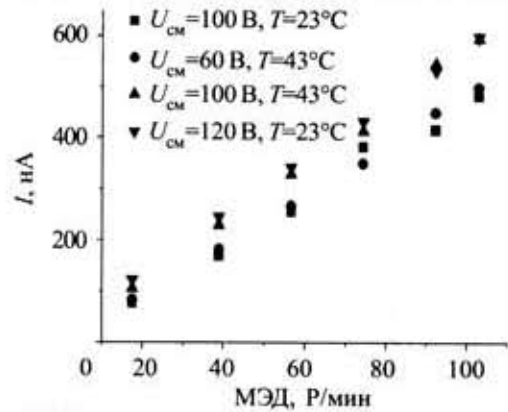


Рис. 4. Дозовая зависимость тока в БД с сенсором из CdTe при разных температурах и напряжениях смещения сохранять работоспособность при большей интенсивности излучения, чем БД с CdTe.

Непосредственное сравнение токов в БД с CdTe и CdZnTe в зависимости от МЭД при $U_{см}=120$ В приведено на рис. 5.

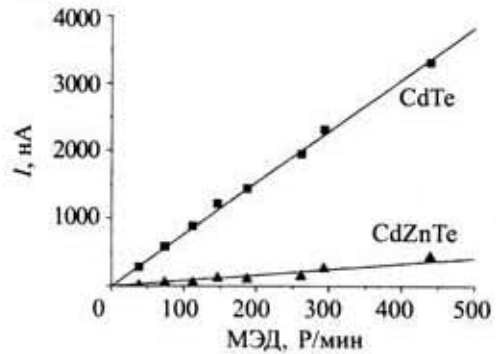


Рис. 5. Сравнение дозовых зависимостей токов БД с сенсорами из CdTe и CdZnTe при $U_{см}=120$ В

Таким образом, разработанный БД для контроля больших мощностей доз рентгеновского излучения в токовом режиме измерения может регистрировать рентгеновское излучение с энергией от 5 кэВ в широком интервале значений мощности экспозиционных доз, вплоть до аварийных уровней излучения (практически до 450 Р/мин и более).

Спектрометрия рентгеновского излучения

Основной задачей, которая ставилась при разработке спектрометрического блока детектирования, являлось улучшение его энергетического разрешения в рентгеновском диапазоне энергий. Энергетическое разрешение спектрометра ионизирующего излучения с полупроводниковым сенсором определяется рядом параметров. Это, прежде всего, эффективность собирания носителей заряда, возникающих при взаимодействии излучения с сенсором. Эта эффективность зависит как от качества материала сенсора (время жизни и подвижность носителей заряда, степень дефектности кристалла), так и от приложенного к сенсору напряжения. Важным фактором, вносящим существенный вклад в величину энергетического разрешения, является также электрический шум системы "сенсор—предусилитель". Эти особенности были учтены при разработке спектрометри-

ческого блока детектирования рентгеновского излучения.

Конструктивно спектрометрический БД состоит из CdZnTe-сенсора, предварительного усилителя и термостабилизатора. Для ввода излучения корпус БД снабжен тонким (20 мкм) Ве-окном. Измерительный тракт состоит также из блока усилителя-формирователя и компьютера (рис. 6).



Рис. 6. Спектрометр рентгеновского излучения

Измерительный тракт спектрометра был выполнен с использованием элементной базы фирмы Analog Devices. Сигнал с CdZnTe-сенсора поступал на предварительный усилитель. С предусилителя импульсы поступают в блок усилителя-формирователя, содержащий сам усилитель-формирователь, АЦП и блок питания всего прибора. После цифровой обработки при помощи 12-разрядного АЦП сигнал поступал в компьютер.

Для исключения шумового вклада входной разделительной емкости в данной конструкции БД сенсор подключен непосредственно к затвору транзистора первого каскада предусилителя. Конструкция прибора позволяла установку полупроводниковых CdZnTe-сенсоров разных размеров, а также сенсоров из CdTe. Кроме того, БД был оснащен устройством термостабилизации (на эффекте Пельтье), позволяющим поддерживать температуру сенсора в диапазоне $-30...+30^{\circ}\text{C}$.

Небольшые габариты (30×40×35 мм) и возможность размещения БД на удалении от усилителя-формирователя (до 10 м) позволяют применять спектрометр вместе с дистанционно управляемыми манипуляторами, например, для анализа радиоактивных отходов в труднодоступных местах либо в условиях высоких уровней рентгеновского излучения.

Спектры, иллюстрирующие работу спектрометра в рентгеновском диапазоне энергий, приведены на рис. 7—9. Отметим сразу, что приведенные спектры получены без электронной коррекции сигнала и без математической обработки результатов измерений, что позволяет дополнительно улучшить энергетическое разрешение прибора.

На рис. 7 представлен типичный спектр источника ^{241}Am из набора образцовых спектрометрических источников гамма-излучения (ОСГИ), измеренный в диапазоне энергий 10...60 кэВ при $+27^{\circ}\text{C}$ с помощью спектрометрического БД с сенсором из CdZnTe размерами 5×5×2 мм. Время набора 30 с, расстояние до источника 1 см. Энергетическое разрешение составляет $\approx 14\%$ на линии 60 кэВ.

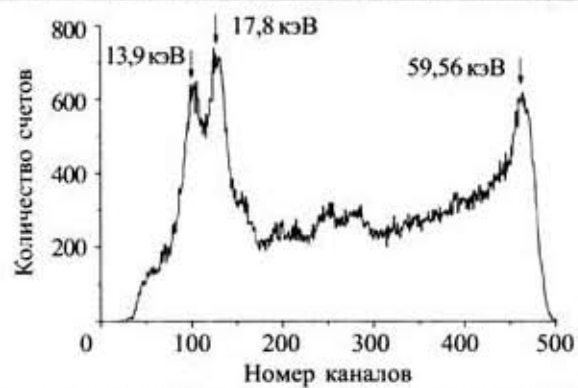


Рис. 7. Спектр ^{241}Am , полученный сенсором из CdZnTe

Мы видим, что полупроводниковые кристаллы CdZnTe, которые хорошо зарекомендовали себя в качестве материала для спектрометрических сенсоров гамма-излучения в диапазоне нескольких сотен кэВ, являются чувствительными сенсорами в рентгеновском диапазоне энергий, обеспечивая удовлетворительное энергетическое разрешение даже при работе сенсора без охлаждения. Дополнительное охлаждение сенсора с помощью термостабилизатора на эффекте Пельтье позволяет повысить спектрометрическое разрешение прибора.

Низкоэнергетический спектр радионуклидов ^{55}Fe и ^{241}Am , полученный спектрометрическим БД с CdZnTe-сенсором размерами 5×5×0,5 мм, охлажденным до -30°C , показан на рис. 8.

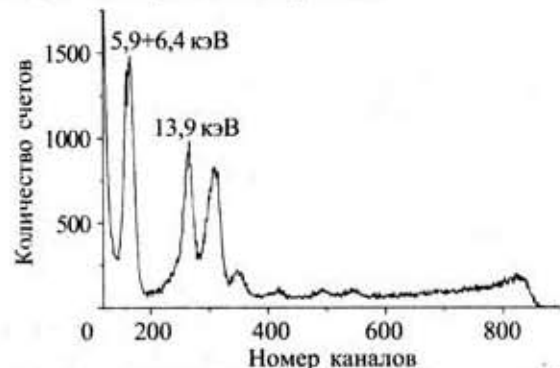


Рис. 8. Низкоэнергетический спектр радионуклидов ^{55}Fe и ^{241}Am , полученный БД с CdZnTe-сенсором толщиной 0,5 мм, охлажденным до -30°C

Понижение температуры до -30°C приводит к разделению линий 13,9 кэВ (разрешение 7,6%) и 17,8 кэВ (разрешение 9,1%), а также появлению линии 5,9+6,4 кэВ (^{55}Fe , разрешение $\approx 12\%$). В процессе измерений входной полевой транзистор предусилителя не охлаждался; не изменялись при охлаждении параметры цепей обработки сигнала и напряжения смещения сенсора (40 В).

С помощью спектрометрического БД с CdZnTe-сенсором имеется возможность регистрировать низкоэнергетические γ -кванты в рентгеновском диапазоне на фоне интенсивных (0,5 Р/ч) потоков высокоэнергетических γ -квантов. На рис. 9 показан спектр $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (дочернего ядра изотопа ^{99}Mo), полученный CdZnTe-сенсором (5×5×1 мм) при комнатной температуре. Высокоэнергетическая часть фона активированной

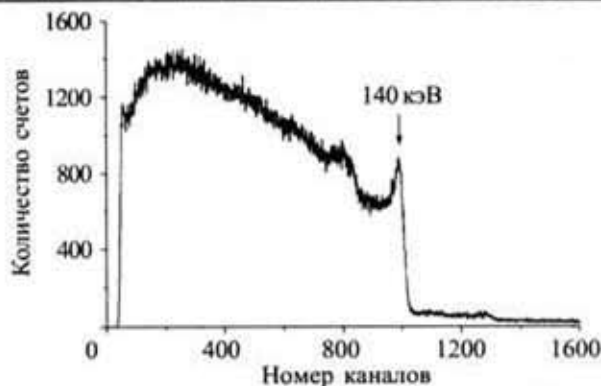


Рис. 9. Спектр активированной мишени ^{99}Mo ($^{99\text{m}}\text{Tc}$), полученный CdZnTe-детектором ($5 \times 5 \times 1$ мм) при комнатной температуре. Использовался фильтр из Cu толщиной 0,5 мм

мишени ^{99}Mo , образованная γ -квантами с энергиями до 800 кэВ и β -частицами, практически не регистрируется за счет небольшой толщины кристалла сенсора (1 мм). Понятно, что чем выше энергия фона, тем меньше оказывается ее вклад.

Выводы

Результаты работы подтверждают, что CdZnTe является хорошим материалом для сенсоров рентге-

новского излучения. На его основе можно с успехом создавать дозиметрические и спектрометрические измерительные приборы, работающие при комнатной (и близких к ней) температуре.

Дозиметр для контроля больших мощностей доз рентгеновского излучения в токовом режиме измерения может регистрировать рентгеновское излучение с энергией от 5 кэВ в широком интервале мощности экспозиционных доз, вплоть до аварийных уровней излучения (практически до 450 Р/мин и более).

Спектрометр рентгеновского излучения на основе сенсора из CdZnTe может применяться для спектроскопии рентгеновского излучения в диапазоне энергий от 5 кэВ, в частности для анализа состава радионуклидов в этом диапазоне.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Rybka A. V., Davydov L. N., Shlyakhov I. N. et al. Gamma-radiation dosimetry with semiconductor CdTe and CdZnTe detectors // Nucl. Instr. and Meth.— 2004.— Vol. 531, N 1–2.— P. 147–156.
2. Давыдов Л. Н., Захарченко А. А., Кутний Д. В. и др. Радиационная стойкость полупроводниковых детекторов корпускулярного и гамма-излучения (обзор) // Вісник ХНУ. Сер. „Ядра, частинки, поля”.— 2005.— № 627.— С. 3–22.
3. Русаков А. А. Рентгенография металлов.— М.: Атомиздат, 1977.

ВЫСТАВКИ, КОНФЕРЕНЦИИ



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



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

проводят

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

**с выставкой разработок и промышленных образцов сенсоров
Украина, Одесса, 26—30 июня 2006 г.**

Научные направления конференции

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

Оргкомитет «СЭМСТ-2»: НИЛ-3

Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова; ул. Дворянская, 2, г. Одесса, 65026, Украина, тел./факс +38(0482)-23-34-61, +38 (048) 726 63 56, Лепих Ярослав Ильич
E-mail: semst-2@ukr.net, semst-2@onu.edu.ua, ndl_lepikh@mail.ru
<http://www.onu.edu.ua/ru/conference/semst2.html>

К. т. н. С. И. КРУКОВСКИЙ

Украина, г. Львов, Научно-производственное предприятие "Карат"
E-mail: krukovsky@polynet.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
22.11 2005 г.

Оппонент д. т. н. Р. В. КОНАКОВА
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

КОМПЛЕКСНО-ЛЕГИРОВАННЫЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ InP/InGaAsP ДЛЯ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

Рассмотрен новый технологический подход к получению высококачественных эпитаксиальных слоев InGaAsP, пригодных для использования в составе приборных структур оптоэлектроники.

Нелегированные эпитаксиальные слои InP и InGaAsP с низкой концентрацией фоновых примесей используются в составе эпитаксиальных структур InP/InGaAsP, на основе которых изготавливаются полевые транзисторы с барьером Шоттки [1], транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT) [2], быстродействующие фотодиоды ближнего инфракрасного диапазона [3]. Для изготовления этих приборов с хорошими параметрами концентрация неконтролируемых примесей в активных слоях структур должна быть как можно ниже. Слои InGaAsP, выращенные методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ), без применения специальных мер, направленных на снижение примесного фона, имеют *n*-тип проводимости и концентрацию носителей заряда от $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ до $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Существенно упростить технологию получения нелегированных слоев позволило использование алюминия и редкоземельных элементов, проявляющих высокую химическую активность по отношению к кислороду, который является одной из основных фоновых примесей в соединениях A_3B_5 [4]. Применение алюминия позволило снизить фоновый уровень в слоях InGaAs до $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ без использования длительного отжига расплавов [5]. Еще более впечатляющие успехи в понижении примесного фона слоев InGaAsP были достигнуты за счет использования в ЖФЭ редкоземельных элементов [6]. В нелегированных эпитаксиальных слоях InP, InGaAs, InGaAsP с использованием этого способа удалось снизить концентрацию носителей до уровня $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ с одновременным возрастанием их подвижности до $(7 \dots 10) \cdot 10^4 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ [7]. Кроме того, в [8] была продемонстрирована высокая химическая активность редкоземельных элементов по отношению не только к кислороду, но и к другим элементам VI группы.

Однако, несмотря на достигнутые результаты по снижению фонового уровня легирования в эпитаксиальных слоях, использование редкоземельных элементов (РЗЭ) сопряжено с рядом трудностей, особенно в фосфорсодержащих соединениях. В первую

очередь это обусловлено высокой химической активностью РЗЭ по отношению к фосфору. Образование химических соединений РЗЭ с фосфором приводит к нарушению фазового равновесия между раствором-расплавом и подложкой, что необходимо учитывать при выращивании эпитаксиальных слоев [8].

Другим нежелательным фактором является критическая концентрация РЗЭ в расплаве индия, выше которой существенно ухудшается морфология эпитаксиальных слоев. Особенно ярко этот эффект проявляется для четверных соединений InGaAsP. Так, для снижения концентрации электронов в них до $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ количество РЗЭ (Yb, Ho, Gd) в расплаве должно быть не менее $(5 \dots 6) \cdot 10^{-2} \text{ ат.}\%$, что на порядок больше, чем при кристаллизации слоев InP с такими же концентрациями [8, 9].

Таким образом, при получении чистых слоев InGaAsP с использованием РЗЭ в действие вступают два конфликтующих фактора. С одной стороны, для снижения концентрации электронов в слоях и повышения их подвижности концентрацию РЗЭ в расплавах необходимо увеличивать, но с другой стороны, увеличение количества РЗЭ в расплаве ухудшает морфологию слоев и нарушает фазовое равновесие в системе In-Ga-As-P.

В данной работе предлагается достаточно простой технологический подход к решению этой проблемы, ранее апробированный в системе GaAs/AlGaAs [10], который базируется на использовании комплексного легирования расплавов индия редкоземельными элементами и алюминием в оптимально подобранных соотношениях.

С этой целью решались две основных задачи. Первая состояла в том, чтобы изучить влияние комплексного легирования редкоземельными элементами и алюминием на электрофизические свойства слоев InGaAsP и на основе этого определить оптимальные соотношения между количеством РЗЭ и алюминия в расплаве индия, при котором обеспечивается низкий фоновый уровень и хорошая морфология слоев. Вторая задача состояла в том, чтобы на примере получения приборных структур InP/InGaAsP для фотоприемников и полевых транзисторов апробировать новый технологический подход и его эффективность.

Методика эксперимента

Эпитаксиальные слои InGaAsP выращивались методом ЖФЭ в графитовой слайдерной кассете из

расплава индия (99,9999) на подложках полуизолирующего InP:Fe с ориентацией (100). Температура начала эпитаксии составляла 650°C, а интервал наращивания — 15°C. Кристаллизация слоев проводилась из переохлажденного на 10°C раствора-расплава. Скорость снижения температуры не превышала 0,8°C/мин. Иттербий, гадолиний и алюминий добавлялись в индиевый расплав непосредственно перед загрузкой реактора в тепловой блок. Концентрация Yb и Gd в растворах-расплавах индия изменялась в пределах от 0 до $9,8 \cdot 10^{-2}$ ат.%, а Al — от 0 до $2,5 \cdot 10^{-2}$ ат.%. Для насыщения расплавов по фосфору использовался поликристаллический InP с концентрацией свободных электронов $(5...7) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Гомогенизация растворов-расплавов осуществлялась в течение 1,2 ч в атмосфере водорода, очищенного через палладиевый барьер. Непосредственно перед началом наращивания поверхность подложки подрастворялась в недонасыщенном расплаве индия. Толщина эпитаксиальных слоев составляла 3—5 мкм.

Для определения влияния комплексного легирования алюминием, Yb и Gd расплавов индия на электрофизические свойства слоев InGaAsP, полученных методом ЖФЭ, были проведены две серии экспериментов. В первой серии изучалось влияние одновременно введенных в индиевый расплав иттербия и алюминия на концентрацию и подвижность носителей в слоях InGaAsP ($\lambda_{\text{ген}} = 1,06 \text{ мкм}$). Выбор для исследования слоев такого состава обусловлен тем, что эти слои широко используются в составе гетероструктур InP/InGaAsP для фотоприемников, чувствительных в ближнем инфракрасном диапазоне 1,0—1,6 мкм, а также светодиодных структур с длиной волны излучения 1,06 мкм. Во второй серии экспериментов определялось изменение концентрации носителей в слоях InGaAsP такого же состава под влиянием гадолиния и алюминия, одновременно добавляемых в индиевый расплав.

Эпитаксиальные гетероструктуры InP/InGaAsP для фотоприемников кристаллизировались на пластинах InP, легированных оловом с кристаллографической ориентацией [100]. Нарастивались два типа гетероструктур, которые отличались концентрацией носителей в слое *i*-InGaAsP и состояли из буферного слоя *n*-InP, легированного оловом, с концентрацией электронов $(7...9) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и толщиной 5—7 мкм, на поверхности которого формировался узкозонный слой *i*-InGaAsP (ширина запрещенной зоны $E_g = 0,95 \text{ эВ}$) толщиной 3—5 мкм, параметры решетки которого хорошо согласуются с параметрами решетки InP. Для гетероструктуры типа *A* слой *i*-InGaAsP формировался из расплава индия, комплексно-легированного иттербием и алюминием. Концентрация электронов в слое не превышала $1,0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Для гетероструктуры типа *B* слой *i*-InGaAsP наращивался из расплава индия, легированного только иттербием, и концентрация электронов в нем составляла $1,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. На поверхности *i*-слоя в обоих типах гетероструктур формировался более широкозонный слой *p*-InGaAsP ($E_g = 1,17 \text{ эВ}$) толщиной 1,5—2,0 мкм, легированный цинком до концентраций $(6...7) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Для исследований на ос-

нове гетероструктур изготавливались мезаструктуры фотодиодов с активной площадью $0,3 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$.

Концентрация и подвижность носителей заряда в слоях InGaAsP измерялась с использованием методики эффекта Холла.

Измерение рельефа поверхности слоев проводилось с помощью профилографа DekTak ПА (США).

Экспериментальные результаты и обсуждение

Результаты исследования образцов, полученных в первой серии экспериментов, приведены на рис. 1. Кривая 1 получена на основе измерения образцов InGaAsP, выращенных из индиевых расплавов, легированных только иттербием. Кривые 2, 3 и 4 получены на основе измерения образцов, легированных иттербием и фиксированными концентрациями алюминия. Результаты измерения концентрации носителей в слоях InGaAsP под влиянием гадолиния и алюминия показаны на рис. 2.

Для всех серий образцов наблюдается уменьшение концентрации электронов и при определенных, критических для каждой из серий образцов, количествах иттербия $X_{\text{Yb}}^{\text{кр}}$ или гадолиния $X_{\text{Gd}}^{\text{кр}}$ в расплаве индия *n*-тип проводимости изменяется на *p*-тип, т. е. имеет место инверсия типа проводимости. Особенностью концентрационной зависимости носителей заряда в слоях InGaAsP является то, что инверсия

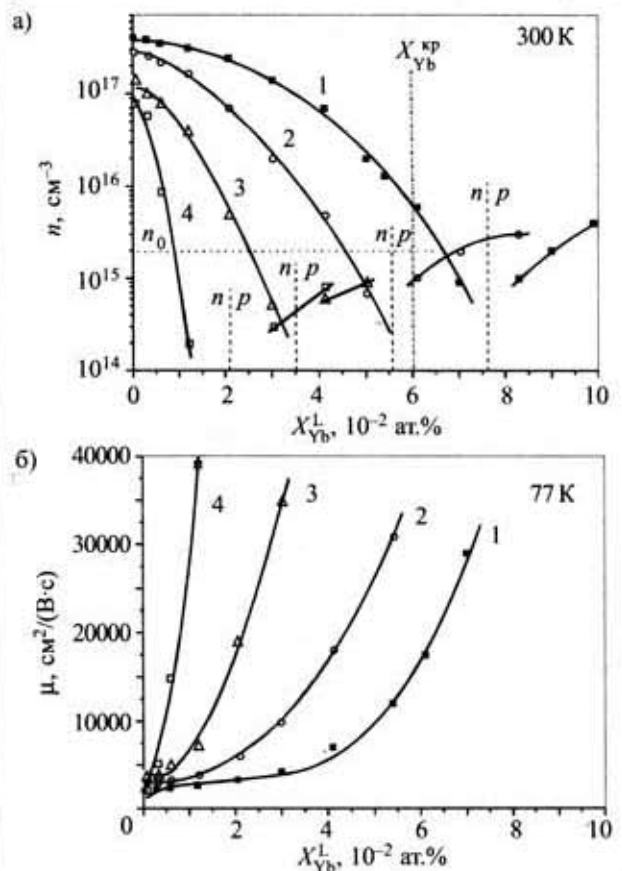


Рис. 1. Зависимость концентрации носителей заряда *n* (а) и их подвижности μ (б) в слоях InGaAsP от количества Yb в расплаве индия при фиксированных значениях концентрации алюминия: 1 — 0 ат.%; 2 — $2,6 \cdot 10^{-3}$ ат.%; 3 — $8 \cdot 10^{-3}$ ат.%; 4 — $2,5 \cdot 10^{-2}$ ат.%

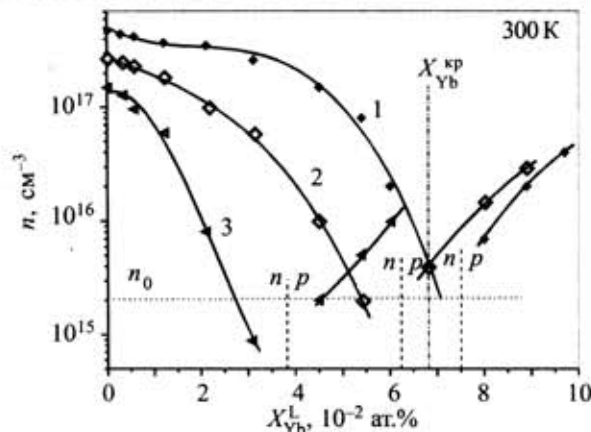


Рис. 2. Зависимость концентрации носителей заряда в слоях InGaAsP от количества Gd в расплаве индия при фиксированных значениях концентрации алюминия: 1 — 0 ат.%; 2 — $2,6 \cdot 10^{-3}$ ат.%; 3 — $8 \cdot 10^{-3}$ ат.%

типа проводимости происходит при тем меньших концентрациях иттербия (или гадолиния), чем выше концентрация алюминия в жидкой фазе. Уменьшение концентрации электронов в слоях InGaAsP в каждой из серий образцов сопровождается увеличением их подвижности (рис. 1, б), и максимальное ее значение достигалось при концентрациях иттербия в расплаве индия, близких к критическим.

Сравнение концентрационных зависимостей основных носителей в слоях InGaAsP, приведенных на рис. 1 и 2, с аналогичными данными, полученными для слоев InP, легированных Yb и Sc [11], показывает, что инверсия типа проводимости в слоях InP происходит при количествах редкоземельных элементов, равных $(5,5 \dots 9) \cdot 10^{-3}$ ат.%. Эти значения почти на порядок меньше, чем количества иттербия и гадолиния, при которых в наших экспериментах были достигнуты минимальные значения концентрации носителей заряда в слоях InGaAsP. Таким образом, для достижения такого же эффекта гетерирования фоновых примесей (снижения концентрации электронов с одновременным повышением их подвижности) в слоях InGaAsP количество редкоземельных элементов в расплаве индия должно быть почти на порядок больше, чем при получении слоев InP. Однако увеличение количества редкоземельных элементов в расплаве индия сопровождается ухудшением морфологии поверхности эпитаксиальных слоев. В наших экспериментах заметное нарушение рельефа поверхности слоев InGaAsP наблюдалось при концентрациях иттербия и гадолиния в расплаве индия, превышающих $6 \cdot 10^{-2}$ ат.% и $6,8 \cdot 10^{-2}$ ат.%, соответственно. Эти критические значения концентрации РЗЭ в расплаве индия отмечены на рис. 1 и 2 линиями X_{Yb}^{kp} , X_{Gd}^{kp} . Для сравнения на рис. 3 приведены два типичных профиля поверхности эпитаксиальных слоев InGaAsP, полученных из индиевых расплавов при концентрации иттербия, превышающей критическую — $X_{Yb} = 7,0 \cdot 10^{-2}$ ат.% (рис. 3, а) и меньших критической — $X_{Yb} = 3,0 \cdot 10^{-2}$ ат.% (рис. 3, б).

При получении эпитаксиальных *i*-InGaAsP-слоев в составе структур для фотоприемников фоновая концентрация носителей должна быть максимально низкой. Это необходимо для того, чтобы, дополнительно

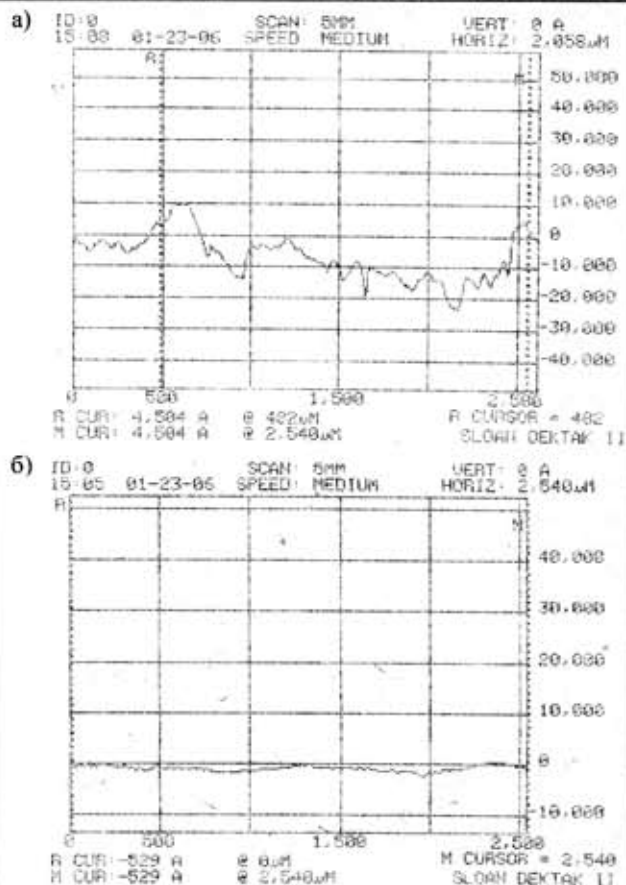


Рис. 3. Типичный профиль поверхности эпитаксиальных слоев InGaAsP, выращенных из индиевых расплавов при разных концентрациях иттербия: а — $X_{Yb} = 7,0 \cdot 10^{-2}$ ат.%; б — $X_{Yb} = 3,0 \cdot 10^{-2}$ ат.%

легируя такие слои донорной или акцепторной примесью, можно было бы воспроизводимо получать достаточно низкий уровень легирования, при котором достигаются наилучшие параметры фотоприемников. Определенное из многочисленных данных [12—16] усредненное значение фоновой концентрации носителей в слоях InGaAsP составляет $\approx 2 \cdot 10^{15}$ см⁻³. На рис. 1 и 2 оно обозначено горизонтальной линией — n_0 . Из рис. 1 видно, что эпитаксиальные слои InGaAsP, легированные только иттербием, с концентрацией носителей, приемлемой для получения приборов (ниже уровня n_0), можно получить с концентрацией иттербия больше критической X_{Yb}^{kp} . Такие слои, как отмечалось выше, имеют плохую морфологию поверхности. Слои же InGaAsP, комплексно легированные иттербием и алюминием с концентрацией носителей, равной и ниже n_0 при всех исследованных значениях алюминия, можно получить при концентрациях иттербия меньше критических X_{Yb}^{kp} . Причем при повышении концентрации алюминия (в исследованных пределах) подвижность в слоях возрастает (рис. 1, а), а концентрация иттербия удаляется от критической. Подобная картина наблюдается и при получении слоев InGaAsP из индиевых расплавов, комплексно легированных гадолинием и алюминием (рис. 2). Однако есть и некоторые отличия. Главное состоит в том, что при тех же концентрациях гадолиния в расплаве индия изменение концентрации носи-

телей на порядок меньше, чем в слоях, выращенных из расплавов, легированных иттербием. Кроме того, практически только слои *n*-типа, комплексно-легированные гадолинием, пригодны для использования в приборных структурах, т. к. концентрация носителей в них ниже n_0 .

На основе анализа данных, приведенных на рис. 1 и 2, была построена зависимость между количеством алюминия и количествами иттербия и гадолиния в расплаве индия, при которых кристаллизуются слои InGaAsP с концентрацией носителей $n_0 = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Концентрация n_0 в слоях достигается при количествах иттербия и гадолиния, меньших $X_{\text{Yb}}^{\text{сп}}$ и $X_{\text{Gd}}^{\text{сп}}$. На рис. 4 приведены оптимальные соотношения между количеством РЗЭ и алюминия в расплаве индия, при которых обеспечиваются низкий фоновый уровень и хорошая морфология слоев InGaAsP. Полученные зависимости были использованы для решения второй части поставленной нами задачи — получения приборных структур *n*-InP/*i*-InGaAsP ($E_g = 0,95 \text{ эВ}$) / *p*-InGaAsP ($E_g = 1,17 \text{ эВ}$) для фотоприемников.

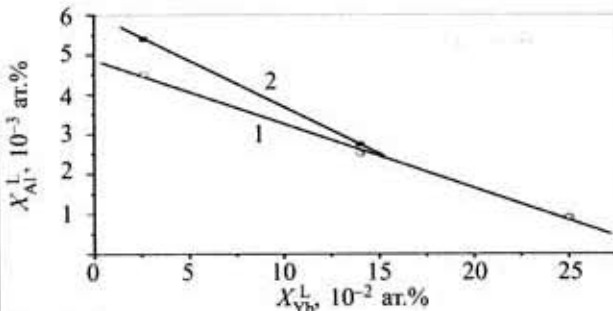


Рис. 4. Соотношения между количеством алюминия и количеством иттербия (1) и гадолиния (2) в расплаве индия, при которых кристаллизуются слои InGaAsP с концентрацией носителей $n_0 = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$

На основе гетероструктуры типа *A* были изготовлены фотодиоды для диапазона волн от 1,0 до 1,5 мкм. Их средняя чувствительность составляла 0,62 А/Вт, причем отклонение чувствительности на краях диапазона не превышало 7%.

Типичные вольт-амперные характеристики двух образцов мезаструктур фотодиодов, изготовленных на основе гетероструктур InP/InGaAsP типа *A* и *B*, приведены на рис. 5. Из рисунка видно, что в образцах,

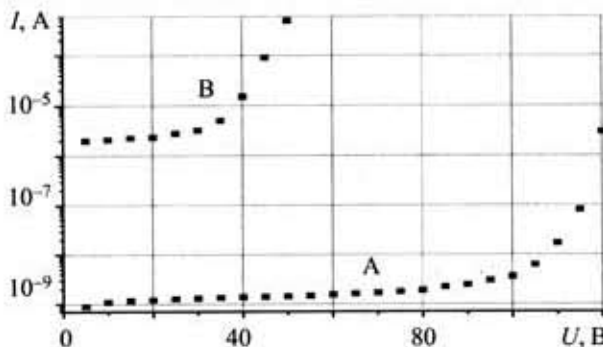


Рис. 5. Обратные ветви вольт-амперных характеристик двух образцов мезаструктур фотодиодов с активной площадью $0,3 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$, изготовленных на основе гетероструктур InP/InGaAsP типа *A* и *B*

изготовленных на основе гетероструктуры типа *A*, величина обратного пробивного напряжения, определенного по вольт-амперной характеристике, находится в пределах 110—120 В. В образцах, изготовленных на основе гетероструктуры типа *B*, где концентрация носителей в фоточувствительном слое равна $1,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, пробивное напряжение не превышает 40—45 В. Экспериментально измеренные значения пробивного напряжения для образцов типа *B* хорошо совпадают с расчетными значениями ($\approx 42 \text{ В}$), определенными согласно формуле [17, с. 111]:

$$V_B = 60 \left(\frac{E_g}{1,1} \right)^{3/2} \left(\frac{N_D}{10^{16}} \right)^{-3/4},$$

где V_B — напряжение пробоя резкого *p-n*-перехода;
 E_g — ширина запрещенной зоны при комнатной температуре, В;
 N_D — концентрация примеси в слаболегированной области, см^{-3} .

Некоторые различия между расчетными ($\approx 190 \dots 200 \text{ В}$) и экспериментально определенными значениями напряжения пробоя для структур типа *A* можно объяснить тем, что концентрация электронов в слое *i*-InGaAsP, принятая для расчета ($1,0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$), была определена на тестовых образцах, а не в эпитаксиальной структуре. При получении эпитаксиальной структуры возможно влияние двух главных факторов на концентрацию носителей заряда в *i*-InGaAsP-слое. Первым из них является диффузия цинка через газовую фазу между ячейками кассеты, из которой наращивается эпитаксиальная структура. Вторым фактором может быть попадание быстродиффундирующих примесей из подложки (например меди или серы). Но влияние этих факторов вполне устранимо.

Величина обратного тока в образцах мезаструктур типа *A* на три порядка ниже, чем в образцах типа *B*. Величина плотности порогового темнового тока в фотодиодах, изготовленных на основе гетероструктуры типа *A*, равна $5 \cdot 10^{-7} \text{ А/см}^2$, а в фотодиодах, изготовленных на основе гетероструктуры типа *B* — $7 \cdot 10^{-4} \text{ А/см}^2$.

Высокая чувствительность фотодиодов, большие обратные напряжения пробоя и низкие плотности темнового тока свидетельствуют об эффективности использованного технологического подхода к получению нелегированных слоев InGaAsP в составе гетероструктур InP/InGaAsP.

Выводы

Определены оптимальные соотношения между количеством РЗЭ и алюминия в расплаве индия, при которых обеспечивается низкий фоновый уровень и хорошая морфология слоев. С применением технологического подхода, который базируется на использовании комплексного легирования индиевых расплавов иттербием и алюминием, получены эпитаксиальные структуры InP/InGaAsP для фотоприемников. Эффективность предложенного технологического подхода подтверждена изготовлением фотодиодов с чувствительностью 0,62 А/Вт в диапазоне длин волн от 1,0 до 1,5 мкм на основе гетероструктур *n*-InP/*i*-InGaAsP ($E_g = 0,95 \text{ эВ}$) / *p*-InGaAsP ($E_g = 1,17 \text{ эВ}$).

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Wu M. Ch., Chiu Ch. M. Very high purity InP layer grown by liquid-phase epitaxy using erbium gettering // *Journal of Applied Physics*.— 1993.— Vol. 73.— P. 468—470.
2. Крещук А. М., Новиков С. В., Савельев И. Г. Низкотемпературная подвижность 2МЭГ и качество гетерограницы в гетероструктурах InGaAs/InP, выращенных жидкофазной эпитаксией // *ФТП*.— 1992.— Т. 26.— С. 1375—1382.
3. Matsushima Y., Sakai K., Yamamoto T. Zn-diffused In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP avalanche photodetector // *Applied Physics Letter*.— 1979.— Vol. 35.— P. 466—468.
4. Аигина Н. Р., Арбенина В. В., Малинина Т. М. Четырехкомпонентные твердые растворы в системе In—Ga—As—P — новый материал электронной техники // *Зарубежная электронная техника*.— 1983.— Вып. 8.— С. 3—82.
5. Kondo S., Amano T., Nagai H. High purity LPE growth of InGaAs by adding Al to melt // *Journal of Crystal Growth*.—1983.— Vol. 64.— P. 433—440.
6. Prochazkova O., Oswald J., Zavadil J., et al. Characterization of InP and GaInAsP layers prepared by liquid-phase epitaxy using holmium doping and gettering // *Materials Science and Engineering*.— 1997.— Vol. B 44.— P. 160—163.
7. Prochazkova O., Zavadil J., Zdanky K. LPE InP layers grown in presence of rare-earth elements // *Ibid.*— 2001.— Vol. B 80.— P. 14—17.
8. Гореленок А. Т., Каманин А. В., Шмидт Н. М. Редкоземельные элементы в технологии A^{III}B^V и приборов на их основе // *ФТП*.— 2003.— Т. 37, вып. 8.— С. 922—940.
9. Crym J. Preparation of InP-based semiconductor materials with low density of defects: effect of Nd, Ho and Tb addition //

Materials Science and Engineering.— 2002.— Vol. B 91—92.— P. 407—411.

10. Пат. 50883 України. Спосіб отримання напівізольюючого арсеніду галію / М. М. Ваків, С. І. Круковський, Ю. Є. Ніколасенко.— 2002.— Бюл. № 11.
11. Круковський С. І., Стахіра Й. М., Фотій В. Д. Властивості епітаксійних шарів InP комплексно легованих рідкісноземельними елементами та алюмінієм // *Тези II Української наук. конф. з фізики напівпровідників*.— Чернівці—Вижниця.— 2004.— Т. 2.— С. 21—22.
12. Rakovics V., Puspoki S., Balazs J. et al. Spectral characteristics of InGaAsP/InP infrared emitting diodes grown by LPE // *Materials Science and Engineering*.— 2002.— Vol. B 91—92.— P. 491—494.
13. Rakovics V., Balazs J., Puspoki S., Frigery C. Influence of LPE growth condition on the electroluminescence properties of InP/InGaAs(P) infrared emitting diodes // *Ibid.*— 2001.— Vol. B 80.— P. 18—22.
14. Nakajima K., Yamazaki S., Takanohashi T., Akita K. Liquid phase epitaxial growth of high purity In_{1-x}Ga_xAs and InP on (100) and (111) faces // *Journal of Crystal Growth*.— 1982.— Vol. 59.— P. 572—582.
15. Foyt A. G. The electro-optic application of InP // *Ibid.*— 1983.— Vol. 54.— P. 1—10.
16. Prochazkova O., Zavadil J., Zdanky K., Novotny J. Effect of holmium addition during LPE Growth on the properties of InP and GaInAsP layers // *Czechoslovak Journal of Physics*.— 1997.— Vol. 47, N. 7.— P. 685—691.
17. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 1.— М.: Мир, 1984.

НОВЫЕ КНИГИ II

НОВЫЕ КНИГИ

Игумнов Д. В., Костюнина Г. П. Основы полупроводниковой электроники.— М.: Горячая линия — Телеком, 2005.— 392 с.

В книге изложены основы построения современных полупроводниковых аналоговых и цифровых устройств. Приведены сведения о физических явлениях в полупроводниковых элементах, рассмотрены различные диоды, биполярные и полевые транзисторы. Описаны особенности интегральных схем. Основное внимание уделяется рассмотрению разнообразных транзисторных и интегральных устройств непрерывного и импульсного действия.

Для студентов вузов и специалистов смежных с электроникой областей, которые занимаются вопросами, требующими от них дополнительных знаний по электронике.



в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

- Полупроводниковые индуктивности. (Украина, г. Винница)
- Модуляция сигналов с квадратурным изменением угловой компоненты. (Украина, г. Одесса)
- Задачи математического обеспечения процессов проектирования несущих конструкций радиоэлектронных средств автоматизированных систем управления. (Россия, г. Санкт-Петербург)
- Проблемы и задачи синтеза формы и структуры конструктивных модулей радиоэлектронных средств. (Россия, г. Санкт-Петербург)



- Емкость тонкого проводника прямоугольного сечения в микросхеме. (Россия, г. Санкт-Петербург)
- Метод распознавания изображений. (Украина, г. Донецк)
- Электрическое сопротивление контакта тонкопленочных резисторов. (Россия, г. Пенза)
- Система паст для металлизации кремниевых фотоэлектрических преобразователей. (Украина, г. Одесса)

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

Д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ, к. ф.-м. н. Д. М. ЁДГОРОВА, У. М. БУЗРУКОВ,
к. ф.-м. н. М. А. МИРДЖАЛИЛОВА, Ш. Ш. БОЛТАЕВА

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

Дата поступления в редакцию
14.11 2005 г.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОФОТОТЕРМИНАЛА

Рассмотренная конструкция микрофототерминала может использоваться для изготовления матриц фотовольтаических элементов или фотоприемных устройств с высокой вольтовой чувствительностью.

Для получения большого выходного сигнала с фотоэлектрических приборов в фотогальваническом или фотоприемном режимах возникает необходимость коммутации дискретных элементов в единую цепочку. Решение этой проблемы может быть осуществлено непосредственным электрическим соединением одного элемента с другим или физико-технологическим путем, что предусматривает разработку твердотельных матричных фотопреобразователей и фотоприемников. Матрицу получают путем соединения последовательно расположенных фотопреобразователей — светочувствительных диодов — через металлические шины, соединяющие омические контакты области одного типа проводимости с областью другого типа следующего элемента. При координатном освещении или при освещении всей поверхности невозможно получить большой выходной сигнал из-за потерь на затененных элементах и за счет различия параметров элементов [1].

Авторы работы [2] с целью перекодировки двумерного оптического изображения в систему электрических сигналов создали матрицу фотодиодно-диодной структуры типа «сэндвич», которая выполнялась на основе трехслойной гетероструктуры с обратновключенными переходами $nCdS-pCdTe-nCdS$ площадью 1 мм^2 . Один элемент с другим соединялся горизонтальными и вертикальными шинами.

В этом аспекте представляет интерес конструкция фотодиодно-диодной структуры, которая обеспечивает сохранение выходного сигнала как фотопреобразователя, так и фотодиода. Здесь светочувствительный и темновой диоды выполнены в отдельности на слое первого типа проводимости в виде двух изолированных областей [3].

Контактные площадки выполнены таким образом, что каждый предыдущий элемент соединяется со следующим с одновременной блокировкой темновым диодом (рис. 1). Тогда световое излучение, падающее на любой из светочувствительных диодов, без

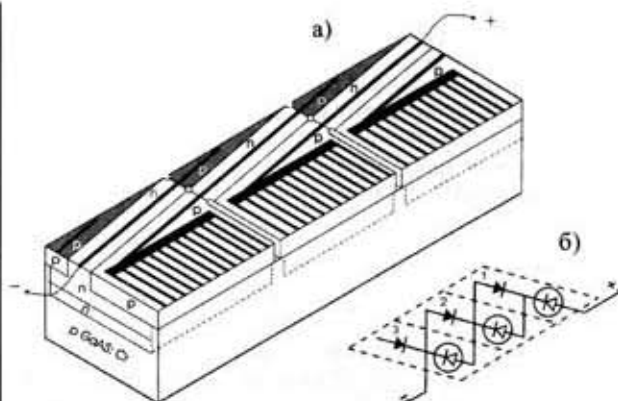


Рис. 1. Общий вид матрицы фотоэлектрического генератора (а) и его эквивалентная схема (б)

потерь будет вызывать фото-эдс на выходе, т. е. полезный ток в затененных участках будет проходить через блокирующие диоды. В результате потери в матрице, по сравнению с последовательным соединением дискретных фотопреобразователей, должны уменьшиться с 40% [1] до 20% за счет исключения потерь в межсоединениях и разности параметров каждого элемента.

В другом случае, за счет возникновения шунтирующего проводящего слоя под диэлектрическим слоем шины, соединяющей один элемент с другим, выходной сигнал уменьшился на 33% по сравнению с дискретным элементом [1].

Матрица состоит из нескольких блокирующих и светочувствительных диодов, соединенных, как показано на рис. 1. Дискретную часть предлагаемой конструкции — отдельный блокирующий диод с последовательно соединенным встречным светочувствительным диодом — мы назвали микрофототерминалом [4]. Толщина его активной области n -типа составляет $2-4 \text{ мкм}$, а диффузионный слой p -типа и того меньше — $0,2-1 \text{ мкм}$. Изучение свойств дискретной части фотоэлектрического генератора [3] с выполненными в едином технологическом процессе темновым диодным и световым фотодиодным $p-n$ -переходами (рис. 1, а, ячейки 1), позволит выявить его функциональные возможности, преимущества и недостатки.

В настоящей работе приводятся результаты исследования фотодиодно-диодной структуры на основе арсенида галлия в фотогальваническом и фотоприемном режимах.

Исследуемая структура содержит светочувствительный элемент большой площади (16 мм^2) и темновой диод (5 мм^2), сформированные на единой подложке (рис. 2). На поверхности арсенида галлия n -типа проводимости выращивается эпитаксиальный слой n -типа с концентрацией носителей $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и толщиной 4 мкм. На поверхность слоя избирательно наносится окисный слой кремния — таким образом, что открытыми остаются две площадки — одна для темнового, другая для светочувствительного диодов. Затем из газовой фазы осуществляют диффузию цинка до уровня концентрации $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и таким образом одновременно получают отделенные друг от друга два $p\text{GaAs}-n\text{GaAs}$ -перехода, соединенных между собой через эпитаксиальный слой $n\text{GaAs}$. Омические контактные площадки получают напылением в вакууме сплава $\text{Ag}+\text{Sn}+\text{In}$ через Ш-образную маску на светочувствительный диод, а на поверхность темнового диода — сплошного слоя этого же сплава и сверху Ni .

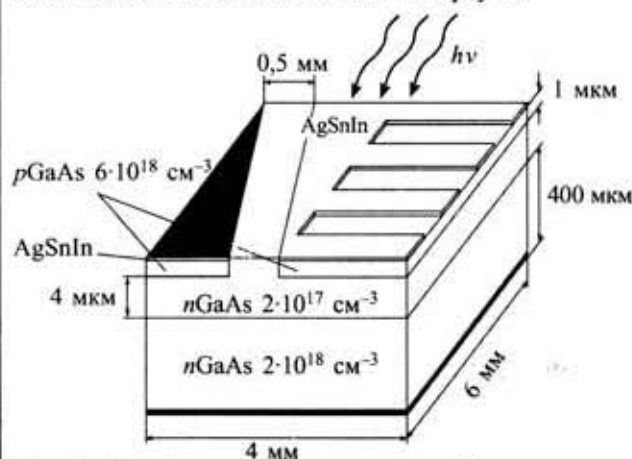


Рис. 2. Общий вид исследуемого микрофототерминала

Для исследования параметров микрофототерминала использовали блок-схему рис. 3. Фотогальванический режим получали путем отключения источника питания тумблером T_3 , при этом переключением тумблера T_2 снимались нагрузочные характеристики светочувствительного диода ($n\text{GaAs}-p\text{GaAs}$) как в отдельности, так и с последовательно соединенным с ним темновым диодом ($p\text{GaAs}-n\text{GaAs}-p\text{GaAs}$).

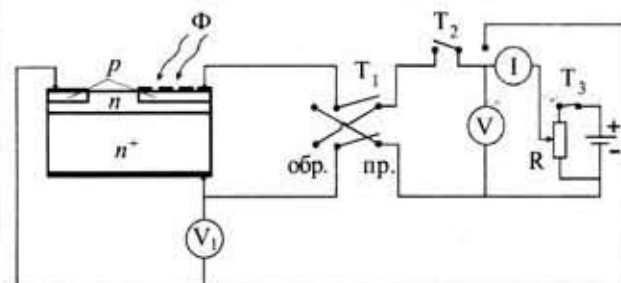


Рис. 3. Принципиальная схема установки для измерений

Сравнение нагрузочных характеристик отдельной фотодиодной и диодно-фотодиодной структур показывает, что в фотогальваническом режиме фототок короткого замыкания претерпевает небольшие изменения (рис. 4). Его величина с $1,794 \text{ мА}$ уменьшается до $1,68 \text{ мА}$ при диодно-фотодиодном включении.

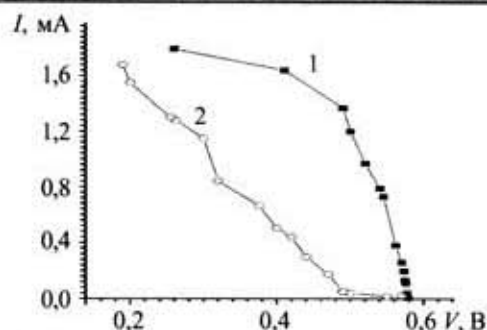


Рис. 4. Нагрузочные характеристики отдельной фотодиодной (1) и диодно-фотодиодной структуры (2)

Здесь необходимо отметить, что сопротивление темнового диода в режиме короткого замыкания, по расчетным данным, составляет 200 Ом .

Расчитанные потери на основе нагрузочной характеристики без светочувствительного диода, подключаемого к темновому диоду, составили $6,3\%$.

При коммутации, т. е. при подключении второй и третьей ячеек (рис. 1), блокирующий темновой диод тоже будет нагружен на светочувствительный фотодиод, т. е. ток в цепи увеличится. Кроме того, необходимо исключить сопротивление амперметра, выступающего как дополнительное нагрузочное сопротивление.

Возможность создания матрицы из светочувствительного и блокирующего диодов определяется, прежде всего, воспроизводимостью и надежностью принципа коммутации дискретных элементов. С этой точки зрения важным является то, что все коммутируемые элементы исследуемой матрицы выполняются в едином процессе. В принципе, за счет простоты конструкции и возможности упрощенного соединения элементов рассмотренный микрофототерминал может быть использован для создания на его основе матрицы.

В фотодиодно-диодной структуре, используемой для обработки световых сигналов, темновые и световые параметры при данном рабочем напряжении должны существенно различаться [2]. Кроме того, темновые и световые характеристики не должны иметь каких-либо аномалий, т. е. изменений механизмов токообразования.

Фотоприемный режим создается при подаче напряжения положительной полярности к p -области ($\text{Ag}+\text{Sn}+\text{In}$)- $p\text{GaAs}-n\text{GaAs}$ -структуры и отрицательной полярности к p -области $n\text{GaAs}-p\text{GaAs}$ - ($\text{Ag}+\text{Sn}+\text{In}$)- $n\text{GaAs}$ -структуры. Параметры светочувствительного ($\text{Ag}+\text{Sn}+\text{In}$)- $p\text{GaAs}-n\text{GaAs}-\text{Sn}$ -диода исследовались при подаче прямого и обратного напряжения к верхнему контакту ($\text{Ag}+\text{Sn}+\text{In}$), с одной стороны, и к сплошному нижнему контакту из Sn , с другой стороны, при переключении тумблера T_1 (рис. 3). Освещение осуществлялось от интегрального источника с максимумом длины волны $\lambda=0,55 \text{ мкм}$.

На рис. 5 приведены вольт-амперные характеристики фотодиодной части ($\text{Ag}+\text{Sn}+\text{In}$)- $p\text{GaAs}-n\text{GaAs}-\text{Sn}$ -перехода. Видно, что в темноте прямой ток изменяется в зависимости от напряжения по экспоненциальному закону с коэффициентом неидеальности

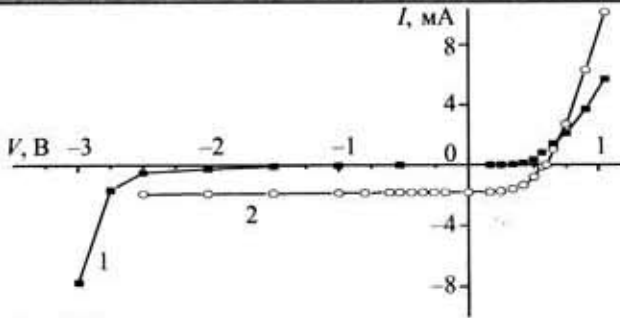


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики светочувствительного диода в темноте (1) и при освещении (2)

$n=2,71$, а обратный ток — по степенному закону с показателем степени $\gamma=0,85$ [5], что обусловлено генерационно-рекомбинационными процессами в слое объемного заряда $p-n$ -перехода.

При освещении в прямом направлении возникает вентиляльная фотоздс с напряжением холостого хода, определяемым точкой пересечения кривой 2 с осью абсцисс ($V_{xx}=0,6$ В), и величиной тока короткого замыкания, определяемой точкой пересечения с осью ординат ($I_{кз}=1,8$ мА). При освещении прямое сопротивление $p-n$ -перехода уменьшается. В обратном направлении с увеличением приложенного напряжения вплоть до 2,5 В фототок (разность светового и темнового значений) сохраняется на одном уровне.

Как показали исследования полученной фотодиодно-диодной (Ag+Sn+In)- $pGaAs-nGaAs-pGaAs-(Ag+Sn+In)Ni$ -структуры, в фотоприемном режиме (при подключении источника напряжения между планарными контактами Ag+Sn+In и Ni тумблер T_2 соединяет «+» источника питания с p -областью темнового диода, а тумблер T_1 находится в положении «обр.» — см. рис. 3) происходит перераспределение прикладываемого напряжения между темновым диодом и фотодиодом. При этом фотодиод по отношению к прикладываемому напряжению включен в обратном запирающем направлении, а темновой диод — в прямом («пр.»).

В целом микрофототерминал представляет собой двухбарьерную структуру на основе прямовключенных $p-n$ -переходов. Поэтому прикладываемое извне напряжение перераспределяется между переходами таким образом, что мы можем измерить напряжение, падающее в темновом диоде:

$$V_{\text{общ}}^{p-n-p} = V_{\text{пр}}^{\text{ТД}} + V_{\text{обр}}^{\text{ФД}} \quad (1)$$

Напряжение прикладываемое $V_{\text{общ}}^{p-n-p}$ и падающее на темновом диоде $V_{\text{пр}}^{\text{ТД}}$ измеряются вольтметрами, а падающее на фотодиоде $V_{\text{обр}}^{\text{ФД}}$ вычисляется из (1).

Значения падающих на соответствующих переходах напряжений и толщины слоя обеднения запираемого фотодиода W^{p-n} в зависимости от общего напряжения в исследованном диапазоне приведены в таблице.

Как видно из таблицы, основная часть напряжения падает на запираемом фотодиоде, увеличивая толщину слоя объемного заряда:

$$W^{p-n} = \left(\frac{2\epsilon\epsilon_0 (N_p + N_n)(V_k + V_{2(\text{обр})})}{q N_p N_n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$V_{\text{общ}}^{p-n-p}$	В темноте			При освещении		
	$V_{\text{пр}}^{\text{ТД}}$, В	$V_{\text{обр}}^{\text{ФД}}$, В	W^{p-n} , см	$V_{\text{пр}}^{\text{ТД}}$, В	$V_{\text{обр}}^{\text{ФД}}$, В	W^{p-n} , см
—	—	—	0,0000089	—	—	—
3,5	—	—	—	0,32	3,18	0,0000167
4	0,25	3,75	0,0000178	0,35	3,65	0,0000176
4,5	0,28	4,22	0,0000186	0,4	4,1	0,0000184
5	0,3	4,7	0,0000194	0,41	4,59	0,0000192
5,5	0,34	5,16	0,00002	0,43	5,07	0,0000199
6	0,4	5,6	0,000021	0,48	5,52	0,0000207
6,5	0,45	6,05	0,0000215	0,52	5,98	0,0000214
7	0,53	6,47	0,0000221	—	—	—

где ϵ, ϵ_0 — диэлектрические проницаемости полупроводника и вакуума, соответственно;

$N_p = 6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ — концентрация носителей в диффузионном слое p -типа;

$N_n = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ — концентрация носителей в эпитаксиальном слое n -типа проводимости;

V_k — контактная разность потенциалов $p-n$ -перехода;

$$V_k = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_p N_n}{n_i^2} = 1,27 \text{ эВ}.$$

Значение толщины слоя объемного заряда запираемого $p-n$ -перехода фотодиода в темноте и при освещении изменяется по одному и тому же закону. Отсюда должно следовать, что если под воздействием света фотоносители генерируются в слое объемного заряда, то с увеличением его толщины фототок должен увеличиваться. Однако в данном случае наблюдается постоянство величины фототока. Очевидно, генерация носителей осуществляется в p -области на глубине диффузионной длины неосновных носителей L_p . Тогда фототок в запираемом переходе будет определяться выражением [6, с. 56]

$$I_{\phi} = qS(\Delta p/\tau_n)d, \quad (3)$$

где S — площадь $p-n$ -перехода;

Δp — концентрация генерированных светом носителей;

τ_n — время жизни неосновных носителей;

d — толщина фронтального слоя p -области.

В данном случае, т. к. $d \approx L_p$, фототок будет определяться только интенсивностью света, и вольт-амперная характеристика будет определяться выражением

$$-I = (I_0 + I^{\phi}) = \frac{qn_i W}{2\tau_{n,p}} + qS(\Delta p/\tau_n)d, \quad (4)$$

где I_0 — темновой ток насыщения;

n_i — собственная концентрация носителей;

W — толщина слоя объемного заряда.

На рис. 6 видно, что величина обратного тока в темноте и при освещении возрастает по одному и тому же закону, что позволяет получить управляемый рабочим напряжением выходной сигнал. Величина этого сигнала (разность темнового и светового напряжения для заданного тока) по сравнению с диодным включением увеличивается в два раза, а фототок (разность темнового и светового тока для заданного напряжения) остается на том же уровне.

Таким образом, фотоэлектрические свойства светочувствительной $nGaAs-pGaAs$ -структуры при фотодиодно-диодном включении $pGaAs-nGaAs-pGaAs$

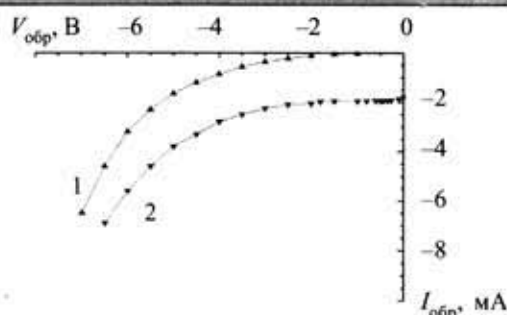


Рис. 6. Обратные ВАХ фотодиодно-диодной структуры: 1 — темновая; 2 — световая

в режиме запириания не только сохраняются, но и улучшаются. В частности, если токовая фоточувствительность

$$S_i^\Phi = \frac{I^{ca} - I'}{\Phi} = \frac{I^\Phi}{\Phi} \quad (5)$$

(Φ — освещенность) не изменяется, то вольтовая фоточувствительность

$$S_v^\Phi = \frac{V' - V^{ca}}{\Phi} = \frac{V^\Phi}{\Phi} \quad (6)$$

возрастает в два раза за счет увеличения фотонапряжения V^Φ с 2,5 В до 5 В.

Так, токовая (вольтовая) фоточувствительность диодной структуры определяется отношением вырабатываемого фототока (фотонапряжения) к падающей световой мощности $S_i^\Phi = I^\Phi / (E_{лк} \cdot S_M^2)$. Здесь $E_{лк} \cdot S_M^2 = \Phi_{лм}$ ($E_{лк}$ — освещенность фотоприемной поверхности, лк; S_M^2 — площадь фотоприемной поверхности, м²; $\Phi_{лм}$ — мощность падающего светового потока, лм). Для интегрального света с максимумом длины волны 0,55 мкм $1 \text{ лм} = 0,0015 \text{ Вт}$ [7, с. 52—56].

Фототок при заданной освещенности $\Phi = 10^3 \text{ лк}$ во всем диапазоне напряжений, начиная от нуля, равен $1,8 \cdot 10^{-3} \text{ А}$. Максимальное значение фотонапряжения в окрестности 5 В составляет 5,05 В, а затем уменьшается до 1,3 В при напряжении 5,95 В (рис. 7).

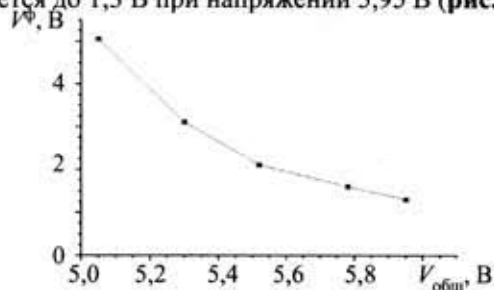


Рис. 7. Зависимость фотонапряжения от прилагаемого напряжения

При площади светочувствительной структуры 16 мм^2 токовая и вольтовая фоточувствительности соответственно составят:

$$S_i^\Phi = \frac{1,8 \cdot 10^{-3} \text{ А}}{10000 \cdot 0,000016 \text{ лк} \cdot \text{м}^2} = \frac{1,8 \cdot 10^{-3} \text{ А}}{0,16 \text{ лм}}$$

$$= \frac{1,8 \cdot 10^{-3} \text{ А}}{0,0015 \cdot 0,16 \text{ Вт}} = \frac{1,8 \cdot 10^{-3} \text{ А}}{0,00024 \text{ Вт}} = 0,75 \text{ А/Вт};$$

$$S_v^\Phi = \frac{5,05 \text{ В}}{0,00024 \text{ Вт}} = 21041 \text{ В/Вт}.$$

(При рабочем напряжении 5,95 В S_v^Φ уменьшается до 5416 В/Вт.)

Таким образом, фотодиодно-диодная структура с фронтальным диффузионным p -слоем, толщина которого сравнима с диффузионной длиной, обладает зависимой от прилагаемого напряжения высокой вольтовой фоточувствительностью, имеющей максимум ($2 \cdot 10^4 \text{ В/Вт}$), в то время как токовая фоточувствительность остается неизменной [8; 9, с. 193—197] ($S_i^\Phi = 0,75 \text{ А/Вт}$).

Заключение

Исследованы фотоэлектрические параметры фотодиодно-диодной (Ag+Sn+In)- p GaAs- n GaAs- p GaAs-(Ag+Sn+In)Ni-структуры, состоящей из встречно включенных фото- и темнового диода, в фотогольваническом и фотоприемном режимах. Показано, что даже при последовательно соединенном встречном темновом диоде фотовольтаические параметры микрофототерминала подвержены незначительным изменениям, а фотоприемные свойства при этом улучшаются. Простота конструкции и возможность упрощенного соединения каждого элемента с последующим делают перспективным использование микрофототерминала для создания на его основе матриц с малыми потерями полезного сигнала на межсоединениях и увеличения плотности упаковки. Высокая вольтовая фоточувствительность, управляемая рабочим напряжением, при неизменной токовой фоточувствительности делает возможным использование фотодиодно-диодной структуры для обработки световых сигналов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Андреев В. М., Егоров Б. В., Лантратов В. М., Сулима О. В. Интегральная солнечная батарея на основе гетерофотоэлементов // Тезисы докладов Всесоюз. конф. «Пути использования солнечной энергии». — Черногоровка. — 1981. — С. 12.
2. Фотоэлектрические явления в полупроводниках и оптоэлектроника / Под ред. Э. И. Адировича. — Ташкент: ФАН, 1972.
3. А с. 1106367 СССР. Полупроводниковый фотоэлектрический генератор / С. А. Азимов, А. В. Каримов — 01.04.84.
4. Каримов А. В. Микрофототерминалы для гелиоэнергетических систем // Гелиотехника. — 1994. — № 6. — С. 14—16.
5. Каримов А. В., Конакова Р. В., Ёдгорова Д. М. и др. Влияние морфологических неоднородностей на механизмы токопередачи в солнечных элементах на основе гетероструктур // Петербургский журнал электроники. — 2004. — № 4. — С. 25—30.
6. Викулин И. М., Стафеев В. И. Физика полупроводниковых приборов. — М. Радио и связь, 1990.
7. Ландсберг Г. С. Оптика. — М.: ГИИТЛ, 1957.
8. Азимов С. А., Карагеоргий-Алкалаев П. М., Каримов А. В., Нирзабаев М. Особенности фоточувствительности арсенидгаллиевых структур типа полевого транзистора // Известия АН УзССР. Сер. физ.-мат. наук. — 1979. — № 2. — С. 44—48.
9. Каримов А. В., Ёдгорова Д. М. Физические явления в арсенидгаллиевых структурах с микрослойным квазизопериодическим переходом. — Ташкент: Фан, 2005.

Г. Г. БАБИЧЕВ, Э. А. ЗИНЧЕНКО, д. ф.-м. н. С. И. КОЗЛОВСКИЙ,
В. В. НЕДОСТУП, д. ф.-м. н. В. А. РОМАНОВ, Н. Н. ШАРАН

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева;
г. Винница, НИИ "Гелий"
E-mail: lab25@isp.kiev.ua, c_polus@svitonline.com

Дата поступления в редакцию
02.12.2005 г.
Оппонент д. т. н. В. В. БАРАНОВ
(БГУИР, г. Минск)

МИНИМИЗАЦИЯ ПОГРЕШНОСТИ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДАВЛЕНИЯ С РАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ МЕМБРАНОЙ

Проведен анализ основной и дополнительной (температурной) погрешностей преобразователя давления с учетом деформации интегрального чувствительного элемента.

Интегральный полупроводниковый преобразователь давления принципиально отличается от интегральной микросхемной схемы обработки информации тем, что чувствительный элемент не может быть полностью изолирован от окружающей среды. Более того, чувствительный элемент должен механически взаимодействовать со средой наиболее рациональным образом, обеспечивая тем самым решение измерительной задачи.

В настоящее время задача измерения давления агрессивных сред является весьма актуальной. При этом защита интегрального чувствительного элемента (ЧЭ) решается двумя путями — нанесением защитных пассивирующих покрытий на ЧЭ и использованием разделяющих мембран (РМ) [1]. В последнем случае давление среды передается мембраной через гидравлическую (инертную) жидкость на интегральный ЧЭ. Такая конструкция позволяет измерять давление в жидких агрессивных или стерильных средах, а также в жидких средах с твердыми включениями. Вместе с тем наличие разделяющей мембраны и гидравлической жидкости может служить причиной как основной погрешности преобразователя давления, так и дополнительной, обусловленной изменением температуры.

В работе [1] проведен анализ температурной погрешности преобразователя давления с РМ без учета влияния деформации ЧЭ преобразователя на его погрешность.

В настоящей работе исследуется конструкция первичного преобразователя давления с РМ с целью

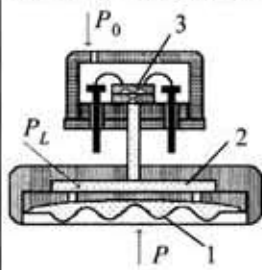


Рис. 1. Конструкция преобразователя давления:
1 — разделительная мембрана; 2 — гидравлическая жидкость; 3 — интегральный чувствительный элемент

Авторы благодарны С. Е. Литвину за помощь при выполнении работы.

минимизации как основной, так и дополнительной (температурной) погрешности с учетом деформации интегрального ЧЭ.

На рис. 1 схематически показана конструкция преобразователя относительного (относительно атмосферы) давления с РМ. Конструкция включает гофрированную РМ 1, гидравлическую жидкость 2, а также измерительный модуль 3, состоящий из кремниевых диафрагмы и основания. Более подробно конструкция и принцип работы измерительного модуля рассмотрены в работе [2].

Анализ конструкции преобразователя проведем при следующих предположениях: рабочая жидкость не содержит газов, заполнение гидравлической жидкостью произведено при температуре $T_0=300$ К и давлении $P_{L0}=100$ кПа. В этих условиях деформации РМ и диафрагмы измерительного модуля в отсутствие внешнего механического воздействия равны нулю.

При подаче давления P на РМ (см. рис. 1) мембрана прогибается под разностью давлений $P-P_L$, где P_L — давление гидравлической жидкости. При этом изменение объема гидравлической жидкости ΔV_L можно записать в виде разности изменений объемов, обусловленных прогибами мембраны (ΔV_M) и кремниевой диафрагмы измерительного модуля (ΔV_S):

$$\Delta V_L = \Delta V_M - \Delta V_S \quad (1)$$

(Уравнение (1) отличается от аналогичного уравнения, приведенного в работе [1], наличием дополнительного слагаемого ΔV_S .)

Изменение объема гидравлической жидкости при сжатии давлением P_L определяется соотношением

$$\Delta V_L = k_L V_0 (P_L - P_{L0}), \quad (2)$$

где k_L — коэффициент объемной сжимаемости жидкости;

V_0 — объем гидравлической жидкости при $P_L = P_{L0}$ и $T = T_0$.

Величина ΔV_M связана с величинами радиуса r_M и толщины h_M РМ соотношением [1]

$$\Delta V_M = \frac{\pi r_M^2 x_M h_M \cdot 2(1 + \alpha)}{3(3 + \alpha)}, \quad (3)$$

где x_M — величина прогиба в центре мембраны, отнесенная к ее толщине;

α — параметр, величина которого зависит от формы и высоты гофра.

Далее будем рассматривать РМ с синусоидальной формой профиля гофрировки и глубиной гофрировки H . Другие формы профиля гофрировки РМ исследованы в работе [1].

В нашем случае $\alpha = \sqrt{1 + (3H^2/2h_M^2)}$, а величину x_M можно найти из уравнения характеристики мембраны

$$\frac{(P - P_L)r_M^4}{E_M h_M^4} = \frac{2(3 + \alpha)(1 + \alpha)}{2[1 - (v/\alpha)^2]} x_M^3 + \frac{32}{\alpha^2 - 9} \left[\frac{1}{6} - \frac{3 - v}{(\alpha - v)(\alpha + 3)} \right] x_M^3. \quad (4)$$

где E_{YM} и v — соответственно модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала, из которого изготовлена мембрана [3, с. 276].

Определим изменение объема, обусловленное деформацией ЧЭ.

В нашем случае интегральный ЧЭ представляет собой кремниевую пластинку с жестким центром [2]. Для пластинки с жестким центром толщиной h_S , радиусами внешнего r_S и внутреннего r_{S0} контуров величина прогиба, отнесенная к толщине пластины, x_S в линейном приближении ($|x_S| \ll 1$) равна [3, с. 237]

$$x_S = \frac{3(1 - v_S^2)[c^4 - 1 - 4c^2 \ln(c)](P_L - P_0)r_S^4}{16c^4 E_{YS} h_S^4}, \quad (5)$$

где E_{YS} и v_S — модуль Юнга и коэффициент Пуассона кремния, соответственно;

$$c = r_S/r_{S0};$$

P_0 — давление, которое подводится к кремниевой диафрагме с внешней стороны (см. рис. 1).

Изменение объема ΔV_S , обусловленное прогибом пластинки с жестким центром [4, с. 48],

$$\Delta V_S = \pi r_{S0}^2 x_S h_S (c^2 + c + 1)/3. \quad (6)$$

Для преобразователя абсолютного, относительного и дифференциального давления величина P_0 в выражении (5) равна соответственно нулю, атмосферному давлению и некоторому давлению P_0 . Таким образом, измеряемая разность давлений равна $P - P_0$ и в общем случае может отличаться от разности давлений на внешней и внутренней сторонах кремниевой диафрагмы измерительного модуля ЧЭ $P_L - P_0$. Тогда выражение для относительной погрешности преобразователя давления можно записать в виде

$$\Delta = \left| \frac{(P - P_0) - (P_L - P_0)}{P - P_0} \right| \times 100\% = \left| \frac{P - P_L}{P - P_0} \right| \times 100\%. \quad (7)$$

Разделительная мембрана является источником погрешностей интегрального преобразователя давления.

Основную погрешность преобразователя в изотермических условиях определяет выражение (7). Ее величина пропорциональна отношению гибкостей РМ и кремниевой диафрагмы. Как следует из выражений (4) и (5) (см. также [5]), гибкости РМ и кремниевой диафрагмы соответственно пропорциональны отношениям r_M^4/h_M^3 и r_S^4/h_S^3 . В связи с этим гибкость РМ должна быть существенно выше гибкости кремниевой диафрагмы. В нашем случае это достигается выбором величин $r_M \gg r_S$ и $h_M < h_S$.

Численную оценку основной погрешности преобразователя проведем при следующих значениях параметров:

— для разделительной мембраны из сплава 81НМА [6, с. 36] $E_{YM} = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па, $h_M = 20$ мкм, $r_M = 11$ мм, $v = 0,3$;

— для кремниевой пластины $E_{YS} = 1,7 \cdot 10^{11}$ Па, $v_S = 0,3$, $h_S = 35$ мкм, $r_S = 1,75$ мм, $c = 1,38$;

— для кремнийорганической гидравлической жидкости: $V_0 = 0,2$ см³, $k_L = 6 \cdot 10^{-10}$ Па⁻¹ [1].

Как следует из выражения (7), для расчета основной погрешности необходимо определить величину давления в объеме гидравлической жидкости P_L . Значение P_L находим подстановкой выражений (2), (3) и (6) в выражение (1). При этом величину относительного прогиба РМ x_M можно найти из кубического уравнения (4), используя решение Кардано [4, с. 43].

На рис. 2 показана расчетная зависимость основной погрешности преобразователя давления с $P = 10$ кПа и $h_S = 20$ мкм от толщины РМ при различных значениях коэффициента гофрировки $k_M = H/h_M$. Здесь значение $k_M = 0$ соответствует плоской мембране.

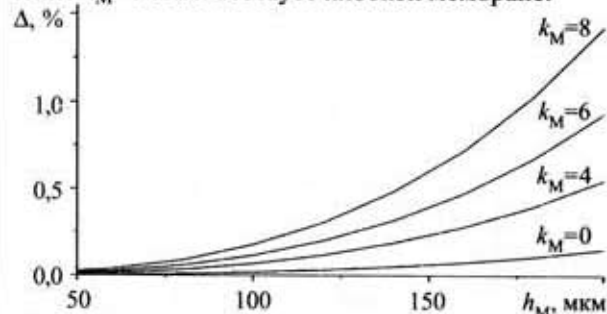


Рис. 2. Зависимость основной погрешности преобразователя от толщины разделительной мембраны при различных значениях коэффициента гофрировки k_M

Как видно из рис. 2, с ростом толщины РМ, а также величины параметра k_M , основная погрешность увеличивается. В этом случае измеряемая разность давлений $P - P_0$ распределяется между интегральным ЧЭ и разделительной мембраной пропорционально их величинам жесткости. При этом разность давлений на интегральном ЧЭ $P_L - P_0$ несколько ниже разности $P - P_0$, что обусловлено малой, но конечной жесткостью РМ.

Поскольку эта погрешность носит систематический характер, она может быть легко учтена при метрологической аттестации преобразователя. Несколько сложнее обстоит дело с температурной погрешностью.

При изменении температуры на величину $\Delta T = T - T_0$ выражение для ΔV_L принимает вид

$$\Delta V_L = V_0 [k_L (P_L - P_{L0}) - (\alpha_L - 3\alpha_H)(T - T_0)], \quad (8)$$

где α_L — коэффициент объемного расширения гидравлической жидкости;

α_H — коэффициент линейного расширения материала корпуса преобразователя.

В расчетах принималось $\alpha_L = 7 \cdot 10^{-4}$ 1/К [1] и $\alpha_H = 1,7 \cdot 10^{-5}$ 1/К (для стали 12Х18Н10ТВ).

Далее, подставляя (8) в уравнение (1), можно найти зависимость $P_L(T)$ при различных значениях параметра k_M в отсутствие внешней нагрузки (рис. 3). В этом случае P_L можно рассматривать как "паразитное" давление, которое возникает вследствие температурного расширения гидравлической жидкости и приводит к появлению нулевого сигнала.

Как видно из рис. 3, в сравнительно узком диапазоне температур (280—320 К) погрешность, вносимая плоской мембраной ($k_M = 0$), меньше погрешно-

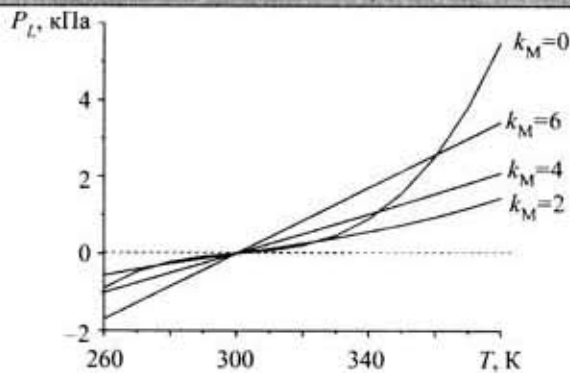


Рис. 3. Зависимость давления гидравлической жидкости от температуры при $P=P_0$ при различных значениях k_M

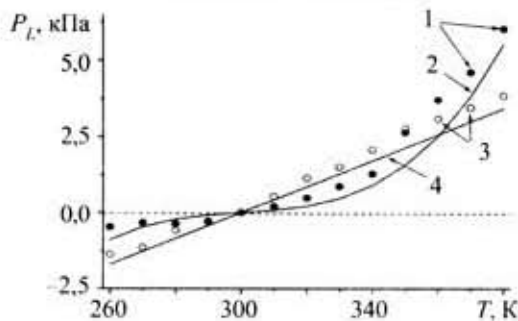


Рис. 4. Экспериментальные (1, 3) и расчетные (2, 4) зависимости давления гидравлической жидкости от температуры при $P=P_0$: 1, 2 — плоская мембрана; 3, 4 — гофрированная мембрана ($k_M=4$)

сти, вносимой гофрированной РМ, при равной толщине. Однако при $T > 330$ К погрешность, вносимая плоской РМ, резко возрастает. Это связано с тем, что при увеличении объема жидкости из-за изменения температуры прогиб РМ достигает величины, близкой к ее толщине, и жесткость РМ растет. Поскольку гофрированная РМ работает при значительно больших величинах прогиба, чем плоская, то ее жесткость с ростом величины прогиба при равных прочих условиях изменяется существенно меньше.

На рис. 4 приведены экспериментальные значения P_L в сравнении с расчетными зависимостями для плоской и гофрированной РМ в отсутствие нагрузки. Совпадение расчетных и экспериментальных значений можно считать удовлетворительным. Зависимость давления гидравлической жидкости от температуры приводит к температурному дрейфу нуля преобразователя давления. Для гофрированной РМ в широком диапазоне температур дрейф нуля пропорционален величине $T-T_0$. Для плоской РМ эта зависимость носит существенно нелинейный характер.

В рассмотренном интегральном преобразователе давления разделительная мембрана является источником основной и дополнительной (температурной) погрешностей.

Основная погрешность является систематической и может быть легко учтена в процессе метрологической аттестации преобразователя.

Температурная погрешность обусловлена дрейфом нулевого сигнала датчика с изменением температуры. За исключением узкого диапазона температур (280—320 К), преобразователь давления с гофрированной РМ при равных прочих условиях имеет более низкую температурную погрешность, чем с плоской РМ.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Stankevic V., Simkevicius C. Thermal errors in media-separating housings of pressure sensors // Sensors and Actuators. — 1999. — Vol. 75. — P. 215—211.
2. Zhadko I. P., Babichev G. G., Kozlovskiy S. I. et al. Silicon pressure transducer with differential sensitive element based on transverse electromotive force effect // Ibid. — 2001. — Vol. 90. — P. 89—95.
3. Андреева Л. Е. Упругие элементы приборов. — М.: Машиностроительная литература, 1962.
4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1978.
5. Pat. 5999082 USA. Compensated oil-filled pressure transducers / A. D. Kurz, J. H. Hayer, R. Gardner et al. — 07.12.99.
6. Справочник по электротехническим материалам. Т. 3. / Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. — Л.: Энергоатомиздат, 1988.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Швец В. А. Одноплатные микроконтроллеры. Проектирование и применение. — М.: МК-Пресс, 2005, 304 с.

Книга посвящена вопросам комплексного проектирования одноплатных микроконтроллеров для информационных и управляющих систем, построенных на универсальных микропроцессорах x86 и микроконтроллерах семейства x51. Подробно рассматриваются вопросы проектирования узлов одноплатных микроконтроллеров, программного обеспечения, применение микропроцессоров в цифровой обработке информации и измерительных устройствах.

Денисенко А. Н. Сигналы. Теоретическая радиотехника. Справочное пособие. — М.: Горячая линия-Телеком, 2005, 704 с.

В сжатой, приемлемой для инженерной и исследовательской практики форме обобщены и достаточно полно изложены методы анализа детерминированных сигналов (часть 1) и случайных сигналов и шумов (часть 2), используемые в теоретической радиотехнике. В каждом разделе теоретическая часть заканчивается расчетными выражениями и примерами расчета по ним.

Для инженеров и исследователей, работающих в области радиотехники, преподавателей, студентов старших курсов радиотехнических факультетов вузов, аспирантов.

Д. т. н. А. А. АЩЕУЛОВ, д. ф.-м. н. И. В. ГУЦУЛ

Украина, г. Черновцы, Институт термоэлектричества, Черновицкий национальный ун-т им. Юрия Федьковича,
E-mail: om@inst.cv.ua

Дата поступления в редакцию
10.01 2006 г.

Оппоненты д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН
(НУ "Львовская политехника", г. Львов),
д. т. н. В. В. ДАНИЛОВ (ДонНУ, г. Донецк)

АНИЗОТРОПНЫЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КООРДИНАТНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЛИНЕЙКИ

Анизотропный оптикотермоэлемент может служить основой для создания различных координатно-чувствительных устройств, работающих в режимах как поверхностного поглощения, так и оптического пропускания.

Для определения координат излучающих объектов используются различные приемники ИК-излучения, в том числе и линейки [1]. Работа их чувствительных элементов основана на использовании фото- или пироэффектов с последующей модуляцией регистрируемого излучения. Безмодуляционные фотоэлектрические приемники квадрантного типа на основе отражающих пирамид и призм характеризуются селективностью своих спектральных характеристик [2, 3]. Вопрос создания неселективного безмодуляционного устройства для определения координат теплового пятна, вызванного падающим лучом в выбранном направлении, остается открытым.

Исследовались термоэлектрические поля анизотропных сред с различной степенью оптической прозрачности [4—6] для случая, когда площадь поперечного сечения падающего луча меньше площади рабочей грани анизотропного оптикотермоэлемента (АОТ). Исследования показали, что величина и знак возникающей поперечной термо-эдс характеризуются, с одной стороны, геометрией расположения теплового пятна, вызванного лучом, с другой — местонахождением токосъемных контактов [7, 8]. Это позволило сделать выводы о том, что в определенных условиях АОТ может служить основой для создания различных координатно-чувствительных устройств, в том числе и однокоординатно-чувствительных анизотропных термоэлектрических линеек (АТЛ), работающих в режимах как поверхностного поглощения, так и оптического пропускания.

Целью настоящей работы является экспериментальная оценка координатной чувствительности таких АТЛ.

Результаты теоретических исследований и численного моделирования показывают [9], что при луче точечной формы (здесь δ — функция точечного источника тепла, определяемого его формой)

$$Q(x, y) = Q \cdot \delta(x - x_0, y - y_0) \quad (1)$$

разность потенциалов ξ , возникающая в "активной" части объема АОТ, может быть представлена в виде

$$\xi(x, y) = \frac{Q}{\pi k} \cdot \frac{\alpha_{13}(x - x_0) + \alpha_{23}(y - y_0)}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}, \quad (2)$$

где x_0, y_0 — координаты падающего луча на верхней грани АОТ;

$Q = \int q ds$ — поток тепла, вызванный падающим лучом;

q — плотность теплового потока;

α_{13}, α_{23} — компоненты тензора термо-эдс;

k — теплопроводность материала АОТ.

В свою очередь эта разность потенциалов обуславливает возникновение на боковых и торцевых гранях АОТ распределение соответствующих падений напряжения U_x и U_y , которые и позволяют определить координаты падающего луча. Эта особенность была использована в двух конструкциях однокоординатночувствительных АТЛ [10, 11], работающих в режиме поверхностного оптического поглощения (рис. 1).

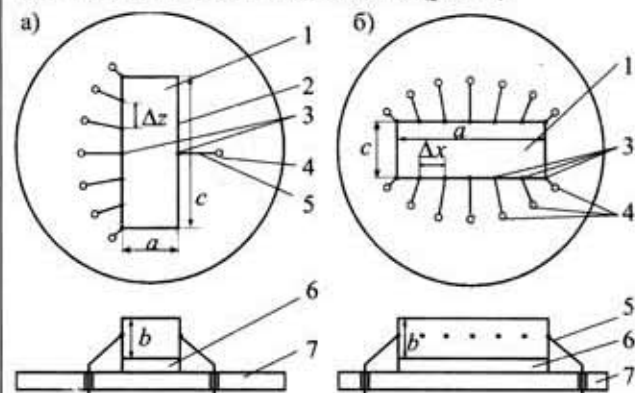


Рис. 1. Конструкции АТЛ:

1 — АОТ; 2 — металлический слой; 3 — электрические микроконтакты; 4 — электровыводы; 5 — соединительные проводники; 6 — диэлектрическая теплопроводящая прокладка; 7 — термостатированный корпус

Основным их элементом является АОТ 1, нижняя рабочая грань ($a \times c$) которого через теплопроводящий диэлектрический слой 6 находится в тепловом контакте с термостатированным корпусом 7. АОТ выполнен из термоэлектрически анизотропного материала в виде четырехгранной прямоугольной призмы так, что кристаллографические оси с минимальным и максимальным значениями термо-эдс расположены в плоскости боковой грани ($a \times b$) и ориентированы под оптимальным углом $\varphi = 45^\circ$ [4] к ее нижней рабочей грани.

В первой конструкции АТЛ (рис. 1, а) одна из торцевых граней АОТ ($b \times c$) содержит $n+1$ точечных электрических микроконтактов, расположенных вдоль ширины c равномерно, через расстояния c/n . Другая торцевая грань АОТ ($b \times c$) содержит электрический контакт в виде металлического слоя, распределенного по всей ее площади. Микроконтакты 3 с помощью микропроводов 5 соединены с расположенными в корпусе 7 электровыводами 4.

Во второй конструкции АТЛ (рис. 1, б) электрические микроконтакты 3 расположены попарно симметрично на обеих боковых гранях ($a \times b$) АОТ через расстояние a/n по длине a .

Общее количество микроконтактов n_x или n_z соответственно вдоль длины a (при $a > b$) или ширины c (при $c > b$) определяется необходимой величиной разрешающей способности АТЛ. Проведенные исследования показали, что ее максимальное значение определяется радиусом r точечного микроконтакта 3 и выбирается не менее $6r$ при выполнении условий $r \ll b$ и $\Delta x \gg r$ (рис. 1, а) или $\Delta z \gg r$ (рис. 1, б). Дальнейшее уменьшение расстояний между контактами ведет к уменьшению чувствительности АТЛ. Общее количество микроконтактов, отвечающее максимальному значению разрешающей способности по длине a или ширине c этих линеек, составляет $n_x = 0,6(a/r)$ или $n_z = 0,6(c/r)$, соответственно.

Вольт-ваттная чувствительность S_x и S_z рассматриваемых АТЛ определяется следующими соотношениями:

$$S_x = \frac{\alpha_{13}}{k} \cdot \frac{n}{a}; \quad (3)$$

$$S_z = \frac{\alpha_{13}}{k} \cdot \frac{n}{c}. \quad (4)$$

Экспериментальные исследования опытных образцов АТЛ проводились с помощью лазера типа ЛГ-126, излучающего на длинах волны λ 0,56; 1,12 и 3,36 мкм энергию плотностью порядка 1 мВт/мм². Неселективное излучение создавалось установкой «черного тела» типа АЧТ-1А, позволяющей задавать излучение с необходимыми энергетическими и геометрическими распределениями. Для исследований были изготовлены АОТ различных размеров из материалов на основе CdSb [12]. Верхняя рабочая грань АОТ содержала неселективное поглощающее покрытие. Перемещение АТЛ относительно падающего луча осуществлялось двухкоординатным столиком в плоскости (xOz) с точностью 10 мкм. Диаметр теплового пятна, вызванного падающим лучом, составлял 0,4—0,5 мм.

На рис. 2 представлены зависимости распределения потенциалов на электрических микроконтактах для двух рассмотренных конструкций АТЛ.

Приведенные результаты показывают, что исследованные АТЛ характеризуются различной координатной чувствительностью. Их можно использовать в качестве устройств, позволяющих определять, с одной стороны, координаты падающего луча в широком спектральном диапазоне, с другой — распределение лучистых потоков и температуры в необходимом геометрическом направлении. Изменение гео-

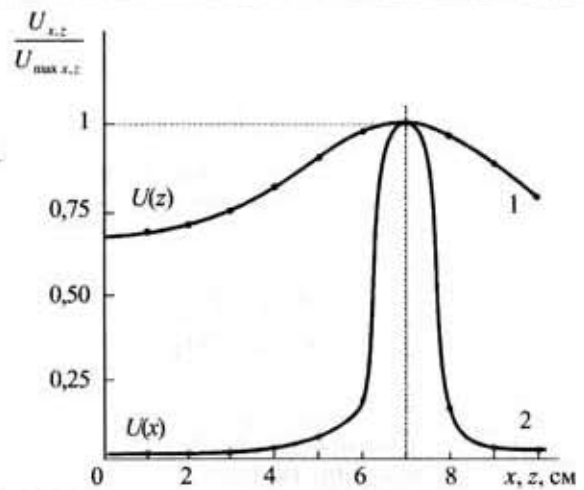


Рис. 2. Зависимость распределения потенциалов на электрических микроконтактах АТЛ:

1 — $a=10$ мм, $b=2$ мм, $c=1$ мм, $\Delta z=1$ мм, координата точки падения луча $x_0=7$ мм (см. рис. 1, а); 2 — $a=1$ мм, $b=2$ мм, $c=10$ мм, $\Delta x=1$ мм, координата точки падения луча $z_0=7$ мм (см. рис. 1, б)

метрических размеров АОТ позволяет в некоторых пределах управлять величиной крутизны координатной чувствительности. В случае высоких плотностей падающих лучистых потоков используется режим оптического пропускания [6].

Таким образом, АОТ может служить реальной основой для создания различных безмодуляционных АТЛ, работающих в широком спектральном и динамическом диапазонах.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники.— К.: Техника, 1980.
2. Кравцов Н. В., Стрельников Ю. В. Позиционно-чувствительные датчики оптических следящих систем.— М.: Наука, 1969.
3. Катус Г. П. Оптические датчики температуры.— М.: Энергоиздат, 1969.
4. Анатъчук Л. И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства.— К.: Наукова думка, 1979.
5. Снарский А. А., Пальти А. М., Ашеулов А. А. Анизотропные термоэлементы // ФТП.— 1997.— Т. 31, № 11.— С. 1281—1298.
6. Ашеулов А. А., Гуцул И. В. Исследование АОТ в случае различных оптических и тепловых режимов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2005.— № 4.— С. 10—18.
7. А. с. 1141954 СССР. Анизотропный термоэлектрический приемник неселективного излучения / А. А. Ашеулов, В. И. Ильин, В. М. Кондратенко, И. М. Раренко.— 22.10.84.
8. Ашеулов А. А., Беспалько В. В., Раренко А. И. Координатно-чувствительный анизотропный термоэлектрический приемник излучения // Оптический журнал.— 1994.— № 2.— С. 51—53.
9. Снарский А. А., Аджигай А. Г., Ашеулов А. А. Координатно-чувствительный анизотропный приемник излучения. Аналитическое описание и численное моделирование // Термоэлектричество.— 2005.— № 1.— С. 84—190.
10. Пат. 63394А України. Анизотропний термоелектричний приймач випромінювання / А. А. Ашеулов, В. Г. Охрем.— 2004.— Бюл. № 1.
11. Пат. 65332А України. Анизотропний термоелектричний приймач випромінювання / А. А. Ашеулов.— 2004.— Бюл. № 3.
12. Ашеулов А. А., Воронка Н. К., Маренкин С. Ф., Раренко И. М. Получение и использование оптимизированных материалов из антимонида кадмия // Неорганические материалы.— 1996.— Т. 12, № 9.— С. 1049—1060.

К. ф.-м. н. В. Н. КАТЕРИНЧУК, М. З. КОВАЛЮК

Украина, г. Черновцы, ЧО Ин-та проблем материаловедения
им. И. Н. Францевича
E-mail: chimsp@unicom.cv.ua

Дата поступления в редакцию
17.01.2006 г.

Оппонент д. т. н. А. А. АЩЕУЛОВ
(Ин-т термоэлектричества, г. Черновцы)

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ $\text{SnS}_{2-x}\text{Se}_x\text{-InSe}$ ($0 \leq x \leq 1$)

Методом оптического контакта полупроводников изготовлены гетеропереходы $\text{SnS}_{2-x}\text{Se}_x\text{-InSe}$. Анализ электрических свойств свидетельствует, что они соответствуют диодам с идеальными характеристиками.

Для кристаллов со слоистой кристаллической структурой наиболее простым методом создания гетеропереходов является метод посадки на оптический контакт [1]. Он позволяет изготавливать образцы гетеропереходов соприкосновением свежеослоотых на воздухе пластин из разных соединений кристаллов при комнатной температуре.

Если для двух полупроводников необходим подбор идентичных кристаллических решеток, их постоянных и коэффициентов линейного расширения [2], то в случае слоистых кристаллов качественные гетеропереходы можно получить даже тогда, когда эти параметры сильно отличаются друг от друга [3—5]. Это позволяет создавать новые гетеропереходы с отличительными фотоэлектрическими свойствами, открывающими возможность получения более высоких удельных характеристик.

В настоящей работе исследованы фотоэлектрические параметры гетероперехода $\text{SnS}_{2-x}\text{Se}_x\text{-InSe}$ в зависимости от величины x ($0 \leq x \leq 1$), где x определяет состав твердых растворов $\text{SnS}_2\text{-SnSe}_2$.

Эксперимент

Кристаллы $\text{SnS}_{2-x}\text{Se}_x$ выращивались методом химических транспортных реакций. Для этого в вакуумированной ампуле на одном ее конце помещалось соответствующее синтезированное соединение. Температурное градиентное поле и переносчик вещества йод создавали условия роста кристаллов на другом конце ампулы. Кристаллы получались в виде хаотически ориентированных по ампуле пластин различных размеров. Все пластинки обладали зеркальной поверхностью. Из эффекта Холла установлено, что при $x=0$, $x=0,1$ образцы имели n -тип проводимости с концентрацией основных носителей тока $n=10^{16} \dots 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и их подвижностью $\mu_{1C} \approx 20 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, где C — кристаллографическая ось, совпадающая с нормалью к плоскости слоя. Удельное сопротивление соединений $\text{SnS}_{2-x}\text{Se}_x$ при больших значениях x отличалось более высокими значениями.

Кристаллы InSe p -типа проводимости выращивались вертикальным методом Бриджмена. Слитки кри-

сталлов имели в диаметре 16—18 мм, а длину — 6—10 см. Благодаря слоистой структуре тонкие пластины из этих слитков вырезались с помощью бритвенного лезвия. Дополнительное отщепление слоев с помощью липкой ленты позволяло получать образцы с зеркальной поверхностью без царапин и других ее повреждений. Поскольку специально не легированные кристаллы имеют всегда n -тип проводимости, то для его изменения они легировались примесью кадмия в количестве 0,1—0,5 мас.%. Холловские измерения позволили определить, что концентрация основных носителей тока составляет $p \approx 5 \cdot 10^{14} \dots 10^{15} \text{ см}^{-3}$, а их подвижность $\mu_{1C} \approx 80 \dots 100 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Свежеослоотые пластины $\text{SnS}_{2-x}\text{Se}_x$ и InSe приводились в тесный механический контакт. Удержание этих разнородных пластин аналогично связи слоев в каждом из слоистых кристаллов, которое обеспечивается ван-дер-ваальсовыми силами. Для широкозонного фронтального полупроводника использовались тонкие (20—30 мкм) пластины $\text{SnS}_{2-x}\text{Se}_x$, в качестве базового $p\text{-InSe}$ — толщиной 200—400 мкм. Для токовых контактов применялся чистый индий. Площадь изготовленных образцов составляла 0,08—0,12 см^2 .

Спектры fotocувствительности изготовленных гетеропереходов исследовались с помощью монохроматора МДР-3 с разрешающей способностью 2,6 нм/мм. Все спектры нормировались относительно количества падающих фотонов.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) и вольт-фарадные характеристики (ВФХ) гетеропереходов исследовались на установке Schlumberger SI 1255 с компьютерным интерфейсом. Все измерения проводились при комнатной температуре. Температурные зависимости ВАХ исследовались также с помощью фотоэлектрической методики ее измерения (фото-эдс от фототока насыщения).

Результаты исследований

Спектральные зависимости квантовой эффективности фототока η исследуемых гетеропереходов показаны на рис. 1. Полоса fotocувствительности гетероперехода определяется поглощением света в соответствующих полупроводниках. Длинноволновый край спектра различных гетеропереходов во всех случаях обусловлен поглощением света в InSe , ширина запрещенной зоны которого E_g при комнатной температуре равна 1,2 эВ [6]. Широкозонный фронтальный полупроводник не препятствует прохождению света

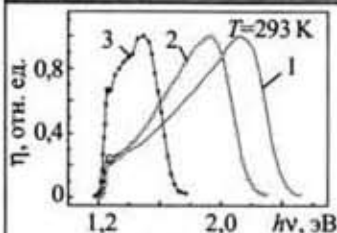


Рис. 1. Спектр квантовой эффективности фототока гетероперехода SnS_{2-x}Se_x-InSe: 1 — x=0; 2 — x=0,4; 3 — x=1

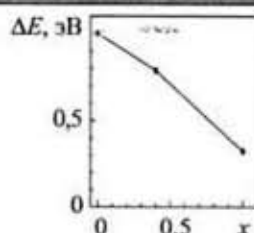


Рис. 2. Зависимость ширины полосы фоточувствительности от величины x

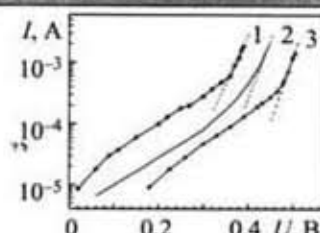


Рис. 3. Температурные зависимости ВАХ гетеропереходов SnS_{2-x}Se_x-InSe для x=1: 1 — 300 К; 2 — 270 К; 3 — 240 К

обычно связывают с токами утечек [9], поскольку ему соответствуют низкие значения тока, и наклон ВАХ, который определяет само значение n , зависит от тщательности приготовления образцов. Для второго — короткого участка ВАХ экспериментальные точки сопоставлены с теоретически рассчитанными ВАХ идеальных диодов (пунктирная линия), для которых $n=1$ [10].

до тех пор, пока энергия квантов $h\nu$ не достигнет величины E_g SnS_{2-x}Se_x. В этом случае свет поглощается в приповерхностной области, не доходит до границы гетероперехода, и разделение фотогенерированных носителей прекращается. Отметим, что ширина запрещенной зоны твердого раствора может изменяться от 0,97 эВ для SnSe₂ до 2,07 эВ для SnS₂ [7].

На рис. 2 показана зависимость величины полосы фоточувствительности ΔE от состава x твердого раствора SnS_{2-x}Se_x. Хорошо видно, что изменением x можно создавать селективные фотоприемники различной полосы фоточувствительности.

Фотоэлектрические параметры гетеропереходов SnS_{2-x}Se_x-InSe при $T=293$ К приведены в таблице (U_{xx} — напряжение холостого хода, $I_{кс}$ — ток короткого замыкания).

Параметры гетеропереходов

x	U_{xx} , В	$J_{кс}$, мА/см ²	ϕ_b , эВ	ΔE , эВ
0	0,5	6,8	0,75	1
0,4	0,33—0,35	1,25	0,35	0,8
0,5	0,3—0,35	1,0	0,35	—
1	0,34—0,4	0,33	0,4	0,32

Результаты измерений емкости C гетеропереходов показали, что в координатах $1/C^2$ от U они имеют линейный характер. Это свидетельствует о резком типе всех созданных $p-n$ -переходов. Найденные из ВФХ значения высоты потенциального барьера ϕ_b позволили качественно проанализировать энергетическую диаграмму гетеропереходов. Вследствие различия в концентрациях носителей полупроводников обедненная область и весь изгиб энергетических зон приходится на более высокоомный InSe. Во всех случаях исследованных гетеропереходов $\phi_b < E_g/2$ при $x > 0$ (см. табл.). Однако для $x=0$, наоборот, $\phi_b > E_g/2$. В этом случае мы имеем ситуацию возникновения инверсионного слоя у межфазной границы гетероперехода и смещения $p-n$ -перехода вглубь InSe. Более детально характеристики гетеропереходов с большим потенциальным барьером рассмотрены в работе [8]. Найденные значения ϕ_b хорошо согласуются с измерениями фото-зс насыщения гетеропереходов, которые также приведены в таблице.

Качество изготовленных гетеропереходов проверялось на основании температурных измерений их ВАХ. В качестве примера на рис. 3 представлены ВАХ гетероперехода SnS_{2-x}Se_x-InSe при $x=1$. Из рисунка видно, что существуют два линейных участка на кривых $I(U)$, отложенных в полулогарифмических координатах. Первый из них, протяженный, характеризуется диодным коэффициентом ВАХ (n), значительно превышающим единицу. Этот участок ВАХ гетероперехода

Хорошо видно качественное совпадение этих кривых. Это позволяет заключить, что начиная с некоторого напряжения прямой диффузионный ток через гетеропереход начинает превосходить токи утечек из-за различной экспоненциальной зависимости этих токов. Поэтому основным механизмом протекания тока через гетеропереход SnS_{2-x}Se_x-InSe следует считать диффузионный. Аналогичные ВАХ характерны и для гетеропереходов SnS_{2-x}Se_x-InSe с другими значениями x .

Выводы

Методом оптического контакта полупроводников изготовлены гетеропереходы SnS_{2-x}Se_x-InSe. Твердые растворы SnS₂-SnSe₂ способствуют получению кристаллов с различной шириной запрещенной зоны: от 1,48 до 2,12 эВ при $0 \leq x \leq 1$. Используемые в качестве широкозонного окна гетероперехода они изменяют его фотоотклик до нужной ширины полосы фоточувствительности.

Анализ электрических свойств полученных гетеропереходов свидетельствует, что они соответствуют диодам с идеальными характеристиками: $p-n$ -переход имеет резкий характер, а экспоненциальная зависимость тока от напряжения описывается диодным коэффициентом $n=1$ при $U > 0,35$ В.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Бакуменко В. Л., Чижко В. Ф. Электрические свойства оптических контактов слоистых полупроводников // ФТП. — 1977. — Т. 11, № 10. — С. 2000—2002.
2. Милнс А., Фойхт Д. Гетеропереходы и переходы металл—полупроводник. — М.: Мир, 1975.
3. Катеринчук В. Н., Ковалюк М. З., Огородник А. Д. Гетероструктуры на основе селенидов индия // Неорг. материалы. — 1996. — Т. 32, № 8. — С. 937—940.
4. Катеринчук В. Н., Ковалюк М. З. Гетеропереходы на основе GaTe // Письма в ЖТФ. — 1999. — Т. 25, № 2. — С. 29—33.
5. Катеринчук В. М., Ковалюк З. Д., Товарицкий М. В. Гетеропереход GaSe-InSe из властивостями структур напівпровідник—тонкий діелектрик—напівпровідник // УФЖ. — 2000. — Т. 45, № 1. — С. 87—91.
6. Landolt-Börnstein. Numerical data and functional relationships in science and technology. New ser. Group III: Crystal and solid state physics. Vol. 17, sv.f / Ed. by O. Madelung. — Berlin e. a.: Springer, 1983.
7. Domingo G., Itoga R. S., Kannewurf C. R. Fundamental optical absorption in SnS₂ and SnSe₂ // Phys. Rev. — 1966. — Vol. 143, N. 2. — P. 536—541.
8. Катеринчук В. Н., Ковалюк М. З. Photoelectric properties of n-SnS₂-p-InSe heterojunction // J. Advanced Materials. — 1997. — Vol. 4, N 1. — P. 40—43.
9. Манассон В. А., Малик А. И., Баранюк В. Б. Эффективный солнечный элемент для работы при низких уровнях освещенности // Письма в ЖТФ. — 1981. — Т. 7, № 9. — С. 549—552.
10. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 2. — М.: Мир, 1984.

И. С. КОНДРАШЕНКОВ

Россия, г. С.-Петербург, НПО «Прибор»
E-mail: ak2000@mail.ru

Дата поступления в редакцию
09.11 2005 г.

Оппонент к. т. н. В. А. ЛАЙНЕ
(НПО "Прибор", г. С.-Петербург)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ АКТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

Предлагается метод моделирования тепловых режимов активных компонентов электронных модулей радиоэлектронных средств на этапе схемотехнического проектирования.

Схемотехническое проектирование высоконадежных электронных модулей (ЭМ) радиоэлектронных средств [1] требует учета множества различных воздействующих факторов. Одним из таких факторов является повышенная температура, оказывающая существенное влияние на параметры полупроводниковых приборов [2] и, следовательно, на характеристики ЭМ и аппаратуры в целом. Поэтому актуальной задачей является анализ тепловых режимов активных компонентов — биполярных и полевых транзисторов — на основе моделирования температурного поля конкретного ЭМ уже на этапе его схемотехнического проектирования.

Точное моделирование температурного поля ЭМ на этапе его проектирования невозможно, т. к. неизвестны его конструктивные параметры [3]. Поэтому целью настоящей работы является получение проектной тепловой модели ЭМ — тепловой модели его активных компонентов.

Для оценки тепловых воздействий воспользуемся собственными перегревами активных компонентов (АК) ϑ . Соответствующую теплофизическую математическую модель получим на основе комплексной тепловой модели ЭМ [4, с. 61], используя следующие условия:

- источник теплоты считается плоским, т. к. топологические размеры в плоскости ЭМ, выполненных по планарной технологии, существенно превышают глубину залегания активных тепловыделяющих областей АК ($p-n$ -переходов и каналов);

- верхняя и боковые поверхности кристалла и корпуса АК являются адиабатическими;

- на нижней поверхности корпуса или кристалла заданы граничные условия первого рода;

- источником теплоты для биполярного транзистора является коллекторный $p-n$ -переход, а для полевого транзистора — канал; размеры источников теплоты определяются размерами области эмиттера и канала, соответственно;

- выделяемая мощность и удельный тепловой поток зависят от режима работы АК и являются функ-

цией их электрических параметров (тока базы I_b и напряжения коллектор-эмиттер $U_{кэ}$ — для биполярного транзистора, напряжений затвор-исток $U_{зи}$ и сток-исток $U_{си}$ — для полевого транзистора), что позволяет организовать прямое взаимодействие теплофизического и схемотехнического проектирования;

— рассматриваем стационарный или квазистационарный тепловой режим (в случае высокочастотных гармонических или импульсных сигналов с малой скважностью [2]), т. к. здесь достигаются максимальные перегревы АК.

Тогда для описания тепловых процессов в АК имеем следующую краевую задачу:

$$\frac{d^2\vartheta}{dx^2} + \frac{d^2\vartheta}{dy^2} + \frac{d^2\vartheta}{dz^2} = 0; \quad (1)$$

$$-\lambda \left. \frac{d\vartheta}{dz} \right|_{z=0} = q(I, U); \quad (2)$$

$$\vartheta(x, y, B_z) = \vartheta_s(x, y, B_z); \quad (3)$$

$$\left. \frac{d\vartheta}{dx} \right|_{x=0} = \left. \frac{d\vartheta}{dx} \right|_{x=B_x} = \left. \frac{d\vartheta}{dy} \right|_{y=0} = \left. \frac{d\vartheta}{dy} \right|_{y=B_y} = 0, \quad (4)$$

где λ — эффективный коэффициент теплопроводности системы "кристалл—корпус";

$q(I, U)$ — плотность теплового потока источника теплоты, зависящая от электрических параметров режима работы АК;

B_x, B_y, B_z — размеры корпуса АК или кристалла (для бескорпусных АК);

ϑ_s — заданное значение перегрева, определяемое особенностями конкретного АК (например, тепловыми сопротивлениями "корпус—радиатор" и "радиатор—среда" для мощных транзисторов, тепловым сопротивлением подложки для бескорпусных АК), в простейшем случае $\vartheta_s = 0$.

Полученную систему уравнений (1)–(4) решаем методом интегральных преобразований [5]. Используя для заданных граничных условий конечное косинус-преобразование Фурье с собственными функциями $\cos(m\pi x/B_x)$ и $\cos(m\pi y/B_y)$ [5, с. 158], получаем выражение для температурного поля кристалла:

$$\vartheta(x, y, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{q_{mn} \cos(m\pi x/B_x) \cos(n\pi y/B_y) \operatorname{sh}[\gamma(B_z - z)]}{\gamma \lambda \operatorname{ch}(\gamma B_z) \operatorname{ch}(\gamma z) [1 - \operatorname{th}(\gamma B_z) \operatorname{th}(\gamma z)] B_x B_y K_n K_m}, \quad (5)$$

$$\text{где } q_{nm} = \int_0^{B_x} \int_0^{B_y} q(I, U) \cos(n\pi x / B_x) \cos(m\pi y / B_y) dx dy; \quad (6)$$

$$\gamma = [(n\pi x / B_x)^2 + (m\pi y / B_y)^2]^{1/2};$$

$$K_n = 1 \text{ при } n=0; K_n = 0,5 \text{ при } n > 0;$$

$$K_m = 1 \text{ при } m=0; K_m = 0,5 \text{ при } m > 0.$$

Для расчета перегрева конкретного типа АК необходимо определить распределение плотности потока источника тепла по (6) в различных режимах работы АК, что позволит учитывать неоднородность тепловыделения в активных областях, связанную с такими эффектами как вытеснение тока эмиттера в биполярном транзисторе, отсечка канала в полевом транзисторе и т. д. [2].

Рассмотрим решение такой задачи для МДП-транзисторов [2]. При этом считаем, что в крутой области характеристик источник теплоты (ИТ) имеет размеры канала, а в пологой — разбиваем канал на два ИТ, соответствующих свободной и перекрытой частям. Выражения для тока стока МДП-транзистора для крутого и пологого участков стоквых характеристик имеют вид [2, с. 216; 6]

$$I_c = b(2U_{\text{си}}(U_{\text{зи}} - U_0) - U_{\text{си}}^2); \quad (7)$$

$$I_c = b(U_{\text{зи}} - U_0)^2 L / L_s, \quad (8)$$

где b — удельная крутизна;

U_0 — пороговое напряжение;

L — топологическая длина канала;

L_s — эффективная длина канала — $L_s = (L - \Delta L)$;

ΔL — длина участка отсечки канала.

При работе МДП-транзистора в крутой области, когда величина $U_{\text{си}}$ меньше значения насыщения $U_{\text{си,нас}} = U_{\text{зи}} - U_0$, размеры ИТ равны длине L и ширине W канала, а плотность потока тепла $q = I_c U_{\text{си}} / (LW)$, где I_c определяется по (7). В крутой (активной) области падения напряжения по длине канала неравномерно [2, 6]: на участке L_s оно равно $U_{\text{си,нас}}$, а на участке отсечки ΔL равно $(U_{\text{зи}} - U_{\text{си,нас}})$. Поэтому для более адекватного моделирования представим в данном случае канал в виде двух ИТ. Первый ИТ — с размерами $(L_s \times W)$ и плотностью теплового потока $q = I_c U_{\text{си,нас}} / (L_s W)$, а второй ИТ, соответствующий участку перекрытия канала, имеет размеры $(\Delta L \times W)$ и $q = I_c (U_{\text{зи}} - U_{\text{си,нас}}) / (\Delta L W)$, где I_c определяется по (8).

Проводя интегрирование (6) с учетом (7), получаем изображение плотности потока ИТ при работе транзистора в крутой области:

$$q_{nm} = 4b(2U_{\text{си}}^2(U_{\text{зи}} - U_0) - U_{\text{си}}^3) B_x B_y \cos(n\pi x_0 / B_x) \times \cos(m\pi y_0 / B_y) \sin(0,5nL) \sin(0,5mW) / (\pi^2 nmLW), \quad (9)$$

где x_0, y_0 — координаты центра ИТ.

Для определения размеров ИТ при работе транзистора в крутой области воспользуемся выражением для эффективной длины канала [6, с. 97], на основании которого получим:

$$\Delta L = [2\epsilon_0 \epsilon_x (U_{\text{си}} - U_{\text{зи}} + U_0) / (qN)]^{1/2}, \quad (10)$$

где ϵ_0, ϵ_x — диэлектрическая проницаемость вакуума и материала подложки, соответственно;

q — заряд электрона;

N — концентрация легирующей примеси.

С учетом (8) и (10) после интегрирования имеем для двух ИТ следующие зависимости:

$$q_{nm}^1 = 4b(U_{\text{зи}} - U_0)^2 U_{\text{си,нас}} L B_x B_y \cos(n\pi x_{01} / B_x) \times \cos(m\pi y_0 / B_y) \sin(0,5nL_s) \sin(0,5mW) / (\pi^2 nmL_s^2 W);$$

$$q_{nm}^2 = 4b(U_{\text{зи}} - U_0)^2 (U_{\text{зи}} - U_{\text{си,нас}}) L B_x B_y \cos(n\pi x_{02} / B_x) \times \cos(m\pi y_0 / B_y) \sin(0,5n\Delta L) \sin(0,5mW) / (\pi^2 nm\Delta L W).$$

Здесь координаты центров ИТ по оси X являются функцией управляющих напряжений и определяются с учетом (10):

$$x_{01} = x_n + 0,5(L - \Delta L);$$

$$x_{02} = x_n + L - 0,5\Delta L,$$

где x_n — координата начальной точки канала у истока.

Таким образом, при работе в активной области температурное поле кристалла будет суперпозицией полей, создаваемых каждым ИТ:

$$\vartheta(x, y, z) = \vartheta(x, y, z, q^1) + \vartheta(x, y, z, q^2).$$

Подобный подход может применяться и для полевого транзистора с управляющим p - n -переходом.

Предложенные модели позволяют проводить расчет температурных полей активных компонентов электронных модулей, используя в качестве исходных данных информацию об электрическом режиме работы модуля, после моделирования на ЭВМ электрических схем. Это позволяет организовать интеграцию моделирования электрических схем и расчета температурных полей активных компонентов схем с дальнейшим проведением схмотехнического и уточненного теплофизического проектирования.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. ГОСТ Р 52003 – 2003. Уровни разукрупнения радиоэлектронных средств. Термины и определения.
2. Тугов Н. М., Глебов Б. А., Чарыков Н. А. Полупроводниковые приборы. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Шерин К. Ю. Синтез типоразмерных рядов базовых несущих конструкций радиоэлектронных средств. — СПб: СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2000.
4. Лутченков Л. С., Лайне В. А. Моделирование и анализ тепловых режимов аппаратуры многоканальной связи. — СПб: СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 1995.
5. Карташов Э. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. — М.: Высшая школа, 1985.
6. Проектирование СБИС / М. Ватанабэ, К. Асада, С. Кани, Т. Оцуки. — М.: Мир, 1988.

Д. Л. АНУФРИЕВ, И. И. РУБЦЕВИЧ, А. Ф. КЕРЕНЦЕВ

Дата поступления в редакцию
15.11.2005 г.

Республика Беларусь, г. Минск, Завод "Транзистор"
E-mail: AKerentsev@transistor.com.by

Оппонент к. ф. -м. н. С. Д. ВОТОРОПИН
(НИИПП, г. Томск)

ПОВЕРХНОСТНЫЙ МОНТАЖ МОЩНЫХ БЕСКОРПУСНЫХ MOSFET-ТРАНЗИСТОРОВ

Разработаны конструкции бескорпусных мощных MOSFET-транзисторов на безвыводном кристаллодержателе и кристаллодержателе с внешними выводами для эффективного поверхностного монтажа.

В настоящее время метод поверхностного монтажа электронных компонентов на платы является одним из перспективных направлений сборки блоков РЭА, к которым предъявляются требования миниатюрности и невосприимчивости к низкочастотной вибрации.

В технологии поверхностного монтажа выделяют два основных направления [1]:

а) технология монтажа в плоских корпусах с планарным расположением выводов на печатной плате (Surface Mount Technology — SMT). При этом в качестве активных электронных компонентов наиболее широко используются транзисторы в пластмассовых корпусах типа SOT-23, SOT-223, D-Pak, D²-Pak (SMD-220). Перспективными в этом случае являются изделия в герметичных металлокерамических корпусах типа SMD-0,5, -1, -2, которые позволяют осуществлять дальнейшую микроминиатюризацию, уменьшение массы при обеспечении высокой рассеиваемой мощности и сохранении герметичности после длительных термоциклических нагрузок [2];

б) технология совмещенного монтажа кристаллов в корпусе и без него (Chip on Board — COB), а также

монтажа кристалла на коммутационной плате (Chip-and-Wire Technology — CWT), который подразумевает проводное соединение непосредственно приложенного к плате кристалла с печатными проводниками платы. Электрические соединения выполняются проводниками из золота или алюминия методом ультразвуковой сварки. Занимаемая ими область заливается эпоксидной смолой. Преимущества по сравнению с технологией поверхностного монтажа SMT — компактность (за счет экономии места) и экономичность (т. к. нет пластикового корпуса).

В данной работе представлены результаты исследования влияния способа монтажа кристаллов на уровень параметров мощного MOSFET-транзистора различных конструкций:

— вариант 1 — транзистор в бескорпусном исполнении на металлическом кристаллодержателе без внешних выводов (см. рис. 1, а);

— вариант 2 — транзистор в бескорпусном исполнении на металлокерамическом или керамическом держателе с внешними выводами (рис. 1, б).

Сборка приборов

При изготовлении приборов по 1-му варианту исполнения присоединение кристалла к молибденовому кристаллодержателю осуществлялось методом контактно-реактивной эвтектической пайки с образованием эвтектики Au-Si и использованием дополнительной золотой прокладки размерами 4,0×4,0×0,016 мм. Для сравнения напайка кристаллов проводилась на двух

установках — ручной типа ЭМ-415 и автоматической типа ЭМ-4085. Монтаж кристаллов на установке ЭМ-415 осуществлялся в следующих режимах: температура $T=420...450^{\circ}\text{C}$, максимальная вибрация вдоль короткой стороны кристалла, время воздействия вибрации 10 с, давление на инструмент 0,40—1,10 Н, подогрев инструмента до 250°C (цвет спирали красный). Для обеспечения плоскостности торца инструмента с поверхностью кристаллодержателя проводилась регулировка с последующей проверкой качества отпечатка инструмента на алюминиевой фоль-



Рис. 1. Мощный MOSFET-транзистор в бескорпусном исполнении:
а — на безвыводном металлическом держателе; б — с внешними выводами на металло-керамическом или керамическом держателе

ге. После настройки рабочего инструмента (иглы) отпечаток ее торца по контрастности должен быть равномерным по площади).

В процессе монтажа было выявлено влияние технологических режимов на качество присоединения кристаллов. Так, при увеличении нагрузки на инструмент до 1,10 Н происходит резкое затухание амплитуды колебаний присоединяемого кристалла, что способствует формированию в эвтектическом слое дефектов в виде неоднородностей и пустот. Наличие таких дефектов для мощных приборов недопустимо, т. к. в процессе эксплуатации будет происходить перегрев активной структуры. Поэтому напайка кристаллов проводилась при давлении на инструмент в пределах 0,40—0,45 Н, при котором еще осуществляются колебательные движения кристалла. Также установлено влияние температуры процесса — при 420°C отмечалось недостаточное растекание эвтектики по периметру кристалла. Формирование эвтектики с требуемым уровнем качества получено при температуре 430—450°C. Для эффективного образования эвтектики требовалось проведение дополнительной активации процесса путем колебания столика вручную на начальной стадии образования эвтектики, при этом в течение всего времени воздействия вибрации инструмента кристалл удерживался в положении пайки.

Монтаж кристаллов на автомате ЭМ-4085 повышает эффективность образования эвтектики Au-Si за счет активации процесса присоединения в результате принудительного движения кристаллов по криволинейной замкнутой траектории, обеспечиваемой программируемыми параметрами вибрации. При амплитуде колебаний кристалла более 250 мкм за 8—10 периодов колебаний происходит эффективное удаление окисных пленок и шлаков за пределы активной зоны, обеспечивая равномерную толщину эвтектики в соединении. Кристаллодержатель фиксировался в ленточной кассете с помощью трех фиксаторов, выступающих над поверхностью кассеты и располагаемых по периметру отверстия. Для повышения эффективности автоматического процесса присоединения кристаллов и быстрого прогрева соединяемых деталей была доработана конструкция нагревательного столика установки в части введения дополнительных повторяющихся выступов диаметром 7,5 мм и высотой до 1,5 мм. Напайка проводилась в следующих режимах: температура 450—460°C, количество периодов колебаний — 12, амплитуда двухкоординатных колебаний по осям X, Y — 250—500 мкм, пауза — 70, давление — 1,45 Н.

При изготовлении приборов по 2-му варианту исполнения присоединение кристалла к кристаллодержателю осуществлялось методом пайки легкоплавким припоем ПОС-10 в конвейерной водородной печи ЖК4007А при $T_{\text{макс}}=400^\circ\text{C}$, скорости движения ленты 80 мм/мин с использованием групповой технологии сборки. Такой метод образования паяного соединения, являясь пассивным, характеризуется повышенным дефектообразованием в виде пустот и дефектов из-за неравномерности слоя припоя под кристаллом [3]. Поэтому с целью снижения дефектности в пая-

ном соединении на кристаллодержатель из псевдосплава MD-40 предварительно наносилось покрытие хим. НЗ, Зл.2, а на непланируемую поверхность кристалла наносилась металлизация Ti-NiV-Ag. Указанные покрытия обеспечивали эффективное смачивание расплавом припоя поверхности как кристалла, так и кристаллодержателя. В процессе пайки к кристаллу прикладывалась статическая нагрузка.

Разварка межсоединений осуществлялась на установке АВТ-2 проволокой АОЦПоМ250А по следующей схеме: затвор — одна перемычка, исток — три перемычки. Далее были проведены операции термовыдержки ($T=150^\circ\text{C}$, $t=24$ ч) и защиты кристалла компаундом СИЭЛ159-322Б. Приклейка керамической крышки к металлокерамическому держателю осуществлялась клеем ВТ10.

Качество монтажа кристаллов

Проверка качества напайки осуществлялась методом оптического контроля внешнего вида с использованием МБС-10 при кратности увеличения 16—32 и ММУ-3 при кратности увеличения 50—100. Установлено, что присоединение кристаллов по 1-му и 2-му вариантам исполнения в оптимальных режимах позволяет получить ровное растекание эвтектики/припоя со всех четырех сторон кристалла без пор и непропаев. В отдельных случаях для 1-го варианта исполнения выявлены утяжки эвтектики из-за имеющихся микросколов в нижней грани кристалла, которые возникли в процессе дисковой резки пластины на кристаллы. В целом качество присоединения кристаллов соответствует требованиям нормативных документов. Прочность крепления кристаллов проверялась путем воздействия сдвигающей нагрузки, создаваемой динамометром 7800-6380-03. При нагрузке 3 Н разрушения кристаллов не происходило.

В процессе исследования качества монтажа кристаллов были использованы следующие диагностические методы анализа:

а) метод рентгенотелевизионного диагностирования внутренних микродефектов (несплошностей, пористости, неоднородностей, инородных включений и т. д.) в паяном соединении;

б) метод лазерной микроинтерферометрии и фотоакустической диагностики качества монтажа и оценки напряженно-деформированного состояния кристаллов.

Результаты анализа регистрировались при помощи цифровой фотокамеры НР912 с экранов мониторов аналитических приборов — рентгенотелевизионного микроскопа МТР-7, лазерного фотоакустического микроскопа ФМ-3М, лазерного микроинтерферометра.

Для приборов 1-го варианта исполнения при контроле методом рентгенотелевизионной дефектоскопии явных несплошностей в эвтектике под кристаллом не обнаружено, но выявлены неоднородности в виде разноконтрастных участков проекции рентгеновского теневого изображения Au-прокладки, частично прореагировавшей по толщине в пределах 60% площади кристалла в связи с неполным растворением прокладки, что обусловлено режимом однокоординатного перемещения кристалла в процессе мон-



Рис. 2. Рентгенограмма паяного соединения под кристаллом:

a — эвтектическая пайка, однокоординатное перемещение на ЭМ-415; *b* — эвтектическая пайка, двухкоординатное перемещение на ЭМ-4085; *в* — пайка через прокладку припоя в конвейерной печи

тажа (рис. 2, *a*). Это указывает на неэффективность метода однокоординатного перемещения кристалла относительно подложки.

Двухкоординатное перемещение кристаллов относительно подложки по замкнутому контуру в процессе монтажа на автомате ЭМ-4085 является оптимальным способом присоединения кристаллов больших размеров. В этом случае дефектов в паяном соединении не выявлено (рис. 2, *b*). Для приборов 2-го варианта исполнения в паяном соединении выявлены локальные несплошности, имеющие линейный размер до 10 мкм (рис. 2, *в*). Методом лазерной микроинтерферометрии определен уровень напряженно-деформированного состояния кристаллов, который составляет 60—72 МПа для 1-го варианта исполнения и 28—45 МПа для 2-го варианта исполнения.

Предельные параметры транзисторов

Контроль статических параметров проводился на измерителе «Гамма 153-04М». Измерения теплового сопротивления «р-п-переход — корпус» $R_{тнк}$ выполнены на измерителе СИС-24. Измерение параметров приборов (вариант 1) осуществлялось на зондовой установке, подключенной к измерителю.

Для проверки предельных параметров изготовленных транзисторов — теплового сопротивления R_p , максимального тока стока $I_{с\ max}$, сопротивления в цепи «сток—исток» $R_{сн}$, проводилась выборочная сборка в условную микросхему в корпусе ТО-3. Для этого использовалась ножка ПАЯ3.551.031, на фланце которой отсутствует медный держатель, а внешние выводы изготовлены из материала МК (медь—ковар). Дискретный кристаллодержатель с напаянным кристаллом приклеивался на поверхность фланца ножки с помощью изолирующего компаунда типа ЭП-91. (Использование изолирующего компаунда позволило уменьшить влияние корпуса ТО-3 при измерении предельных параметров.) После сушки компаунда выполнялась разварка выводов проволокой АОЦПоМ по следующей схеме: затвор — одна перемычка (проволока 150 мкм), исток — две перемычки (проволока 250 мкм) и кристаллодержатель-фланец ножки — две перемычки (проволока 250 мкм).

При проведении испытаний по определению предельной мощности $P_{с\ max}$ приборы размещались на медном теплоотводе с принудительным охлаждением проточной водой, обеспечивающем температуру корпуса 25°C при токе $I_c = 10$ А и напряжении в цепи «сток—исток» $U_{сн} = Var$. Результаты контроля предельных параметров представлены в таблице.

Тип кристалла	Вариант исполнения	$R_{тнк}, °C/Вт$	$R_{сн}, мОм$	$I_{с\ max}, А$	Предельная мощность $P_{с\ max}, Вт$
КП1771А-6	1-й вариант (эвтектика Au-Si, пайка на ЭМ-415)	1,45 ($U_{сн}=10 В, I_c=15 А$)	40 ($I_c=20 А, U_{сн}=10 В$)	39	95130
КП1771А-6	1-й вариант (эвтектика Au-Si, пайка на автомате ЭМ-4085)	1,4 ($U_{сн}=10 В, I_c=15 А$)	40 ($I_c=20 А, U_{сн}=10 В$)	41	100
КП723А	2-й вариант (кристаллодержатель керамический, пайка в печи)	1,8 ($U_{сн}=10 В, I_c=10 А$)	32 ($I_c=31 А, U_{сн}=10 В$)	66	80
КП723А	2-й вариант (кристаллодержатель из сплава MD-40, пайка в печи)	1,0 ($U_{сн}=10 В, I_c=10 А$)	26 ($I_c=31 А, U_{сн}=10 В$)	75	150

Как следует из таблицы, максимальная мощность транзисторов бескорпусного исполнения фактически составляет 100—150 Вт при условии монтажа кристаллов на металлический кристаллодержатель. Сопротивление $R_{сн}$ в цепи «сток—исток» находится в допустимых пределах, определяемых используемым типом кристалла и кристаллодержателя.

В процессе эксплуатации бескорпусной транзистор на плате подвергается циклическому воздействию электрической мощности, вызывающей периодический нагрев кристалла, кристаллодержателя и паяного соединения. При этом из-за различия в температурных коэффициентах линейного расширения (ТКЛР) кристалла, припоя и подложки в паяном шве возникает деформация сдвига γ [4], определяемая выражением

$$\gamma = \frac{L}{h_w} \left[\frac{L}{Br} - \Delta\alpha(T - T_0) \right],$$

где L — расстояние от центра паяного соединения до максимально удаленной точки галтели паяного шва;

h — общая толщина соединения (толщина кристаллодержателя h_c , паяного шва h_w и платы h_p);

$$B = \frac{6 \frac{L}{h} (1+m)^2}{3(1+m)^2 + (1+my)(m^2 + m^{-1}y^{-1})};$$

$$m = h_p/h_c;$$

h_p/h_c — толщины платы и кристаллодержателя, соответственно;

$$y = E_p/E_c;$$

E_p, E_c — модули упругости платы и кристаллодержателя, соответственно;

r — радиус кривизны;

$\Delta\alpha$ — разность ТКЛР платы и кристаллодержателя;

T, T_0 — температура в процессе испытания и до испытания, соответственно.

В условиях воздействия циклического включения-выключения питания и возникающего при этом градиента температур существенно возрастает деформация сдвига для несогласованных по ТКЛР спаев,

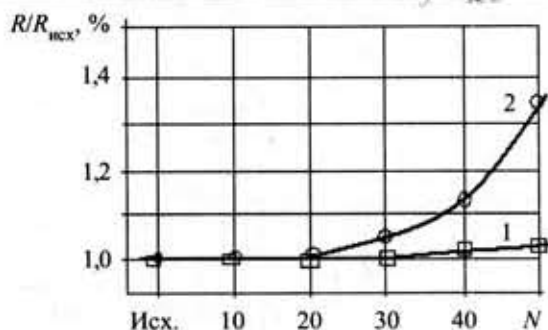


Рис. 3. Зависимость деградации теплового сопротивления $R/R_{исх}$ от числа термоударов N : 1 — монтаж кристаллов на эвтектику Au-Si; 2 — монтаж кристаллов на легкоплавкий припой

вызывая снижение термоусталостного ресурса, появление межзеренного растрескивания и образование пустот в легкоплавком припое [5]. Эти причины приводят к росту переходного теплового сопротивления и последующему перегреву кристалла, вызывая деградацию прибора.

На рис. 3 показано изменение уровня теплового сопротивления при воздействии термоударов $-60 \dots +200^\circ\text{C}$. Как видно из рисунка, в процессе испытаний не выявлено изменения уровня теплового сопротивления в пределах погрешности измерения для приборов, монтаж кристаллов которых выполнен контактно-реактивной пайкой. В то же время приборы, у которых кристалл напаян на легкоплавкий припой ПОС-10, имеют положительную динамику изменения теплового сопротивления.

Заключение

Разработана конструкция бескорпусных мощных MOSFET-транзисторов двух исполнений: вариант 1

— на безвыводном молибденовом кристаллодержателе; вариант 2 — с внешними выводами на металло-керамическом держателе (изолированный кристаллодержатель из керамики ВК-94, либо металлический из сплава MD-40).

Анализ экспериментальных результатов показывает, что монтаж кристаллов на эвтектику Au-Si позволяет значительно повысить устойчивость мощных транзисторов к циклическому изменению температуры. Для получения качественного присоединения монтаж кристаллов необходимо выполнять на оборудовании, обеспечивающем вибрационную пайку с двухкоординатным перемещением кристалла.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кундас С. П., Достанко А. П., Ануфриев Л. П. и др. Технология поверхностного монтажа. — Мн.: «Армита-Маркетинг, Менеджмент», 2000.
2. Рубцевич И. И., Ануфриев Л. П., Керенцев А. Ф. Исследования MOSFET-транзисторов в различных герметичных корпусах для поверхностного монтажа // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2004. — № 5. — С. 54—55.
3. Ануфриев Л. П., Керенцев А. Ф., Ланин В. Л. Повышение качества монтажа кристаллов в приборах силовой электроники // Мат-лы II Междунар. науч.-тех. конф. «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств». Т. 1. — Новоолок. — 2002. — С. 17—20.
4. Цыкин А. В., Яковлев Г. А. Повышение надежности несогласованных микрополосковых плат с корпусами СВЧ-модулей при циклических температурных воздействиях // Обзоры по электронной технике. Сер. 7. — 1989. — Вып. 12. — М.: ЦНИИ «Электроника».
5. Кузин А. Г., Лучков Е. Н., Рыбалов Е. И. Малоцикловая термоусталость паяных соединений микроселектронных компонентов при поверхностном монтаже // Там же. Сер. 10. Микроэлектронные устройства. — 1988. — Вып. 1.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Марти Браун. Источники питания. Расчет и конструирование. — К.: МК-Пресс, 2005. — 288 с.

В книге поэтапно показано проектирование широкого набора источников питания. С ее помощью каждый, кто обладает базовыми познаниями в области электроники, сможет проектировать и создавать источники питания. Кроме общих промышленных подходов к конструированию, системно представлено проектирование линейных, импульсных и квазирезонансных источников питания.

В книгу включена информация о проектировании выходных каскадов, о выборе ИС контроллера и других функциях, имеющих отношение к источникам питания, наподобие управления импульсными источниками питания, потери электрического сигнала, отключения внешнего напряжения и др. Кроме того, рассмотрены методики формирования сигналов, уменьшения основной потери, демпферы и квазирезонансные преобразователи.

Трамперт В. AVR-RISC Микроконтроллеры. Архитектура, аппаратные ресурсы, система команд, программирование, применение. — К.: МК-Пресс, 2006. — 464 с.

В книге дано исчерпывающее описание базовой серии микроконтроллеров семейства AVR от компании Atmel, построенных на базе прогрессивной архитектуры RISC с применением программируемой флэш-памяти EPROM. Кроме того, подробно рассматривается программирование микроконтроллеров данной серии на языке ассемблера, а также среда отладки AVR-Studio и программно-аппаратный набор STK200.

Для всех, кто уже обладает основными познаниями в области построения и функционирования микрокомпьютеров, желает изучить однокристалльные микроконтроллеры AVR и успешно претворять в жизнь задачи внутрисхемного управления.



А. С. ИСТОМИН, д. т. н. Э. И. СЕМЕНОВ

Россия, Рыбинская гос. авиационная технологическая академия
им. П. А. Соловьева
Email: root@rgata.ru

Дата поступления в редакцию
13.07 2005 г.

Оппонент к. ф.-м. н. Н. О. КОВАЛЕНКО
(Ин-т монокристаллов, г. Харьков)

ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЙ В ПРОЦЕССЕ ИХ НАНЕСЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЕМКОСТНОГО ДАТЧИКА

Предложена автоматизированная компьютерная система контроля толщины покрытий, реализованная на основе емкостного датчика новой конструкции.

Емкостные датчики обладают рядом существенных достоинств, таких как высокая чувствительность, простота устройства, малые габариты и масса, малая инерционность, весьма небольшие усилия электрического взаимодействия между обкладками датчика.

Принцип действия емкостной измерительной системы основан на том, что с изменением контролируемого параметра изменяется емкость конденсатора.

Существует контактный метод неразрушающего контроля толщины покрытия после его нанесения, описанный в [1]. Его суть состоит в том, что электрический конденсатор образуется металлом подложки, непроводящим покрытием (который в этом случае является диэлектриком) и электродом, прикладываемым к детали (рис. 1).

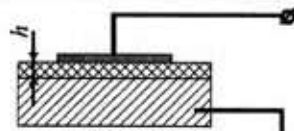


Рис. 1. Контактный метод измерения толщины покрытия h

Такие накладные датчики характеризуются большой неоднородностью создаваемого ими электростатического поля — напряженность поля максимальна (а следовательно, максимальна и чувствительность) непосредственно у поверхности электродов и быстро затухает по мере его удаления от электродов. В связи с этим использование накладных датчиков требует осуществления мер по компенсации влияния контактных условий (шероховатость поверхности, ее загрязнение и прочее).

Для определения толщины диэлектрической пленки в процессе ее нанесения на подложку применяется метод планарного измерительного конденсатора [2, с. 298], обкладки которого расположены в одной плоскости. В качестве проводящих обкладок используются алюминиевые пленки, протравленные методом обычной фоторезистивной техники, в виде узких полосок, разделенных глубокими каналами. При малой толщине диэлектрического слоя (в пределах нескольких микрометров) изменение емкости в зависимости от толщины имеет линейный характер. Поэтому во время напыления очень тонких пленок должна обеспечиваться возможность измерения очень

малых изменений емкости — при том, что величина начальной емкости такой системы весьма сильно зависит от состояния поверхности подложки.

Недостатком данного способа является необходимость калибровки прибора по осаждаемому материалу и периодическая очистка от осажденного на нем слоя. Также этот метод не учитывает зависимости емкости от температуры, а также зависимости свойств диэлектрической пленки от параметров процесса осаждения, и позволяет контролировать толщину только диэлектрических слоев.

Существует также метод контроля скорости нанесения покрытий в вакууме, основанный на измерениях крайних малых изменений электрической емкости [2, с. 300]. На рис. 2 приведена схема системы контроля скорости испарения.

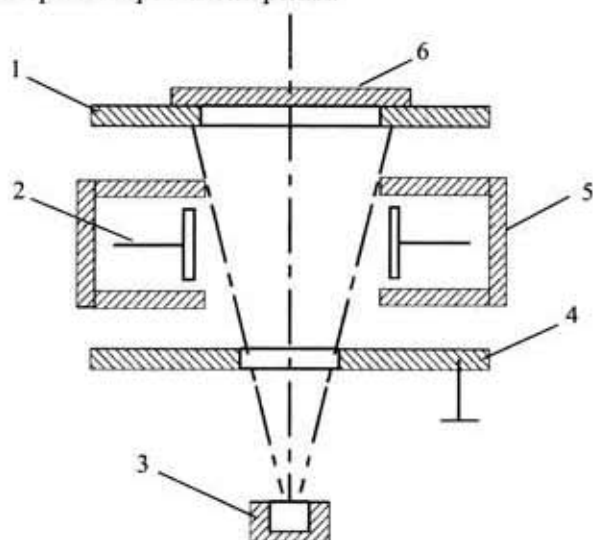


Рис. 2. Система контроля скорости испарения:
1 — маска с опорной деталью; 2 — емкостный датчик; 3 — испаритель; 4 — тепловой экран; 5 — камера датчика; 6 — подложка

В данной системе поток испаряемого вещества проходит через пространство между двумя плоскопараллельными электродами, расположенными внутри вакуумной камеры. Эти электроды при отсутствии потока паров образуют вакуумный конденсатор. Если в зазор между пластинками попадают пары какого-либо вещества, то эффективная диэлектрическая проницаемость среды изменяется, вызывая соответствующее изменение емкости конденсатора, которое мож-

но измерить. Изменение емкости конденсатора пропорционально скорости осаждения слоя.

Недостатком данного способа является необходимость достаточно плотного потока напыляемого вещества для его регистрации, а также необходимость тщательного экранирования датчика для исключения влияния помех.

Указанных недостатков можно избежать с помощью емкостного датчика, выполненного с применением сетки (или перфорации) [3].

Предлагаемый метод позволяет контролировать толщину покрытий при нанесении в вакууме разными методами и при разных давлениях рабочего объема (например, аэрозольным, детонационным напылением). Диэлектриком конденсатора служит рабочая среда установки (вакуум, воздух, газы). Осаждаемым материалом может быть металл или диэлектрик.

На рис. 3 приведена схема емкостного датчика для измерения толщины покрытия в вакууме. Суть предлагаемого метода заключается в следующем. Поток паров осаждаемого материала проходит через сетчатую обкладку конденсатора и осаждается на сплошной, при этом расстояние h между обкладками изменяется, и соответственно изменяется емкость конденсатора.

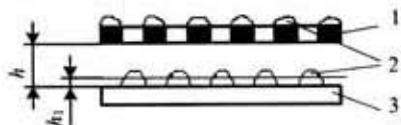


Рис. 3. Структура емкостного датчика:
1 — сетка; 2 — нанесенный материал; 3 — сплошная обкладка конденсатора

Изменение емкости в зависимости от толщины наносимого на сплошную обкладку материала h_1 имеет нелинейный характер и вычисляется по формуле [4, с. 153]

$$\Delta C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon L}{\ln \frac{L}{2a\Delta h_1} + D} \quad (1)$$

где ϵ_0 — диэлектрическая постоянная;

ϵ — диэлектрическая проницаемость среды;

L — суммарная длина всех проводов, образующих решетку;

a — диаметр провода решетки;

Δh_1 — приращение толщины нанесенного покрытия;

D — коэффициент, зависящий от соотношения размера решетки и числа ее ячеек [4, с. 147].

При осаждении диэлектрической пленки

$$\epsilon = \epsilon_{cp} = \frac{\epsilon_1(h-h_1) + \epsilon_2(h+h_1)}{h} \quad (2)$$

где ϵ_{cp} — средняя диэлектрическая проницаемость двух слоев диэлектрика (в нашем случае — наносимого диэлектрического материала и рабочей среды вакуумной камеры).

Величина емкости конденсатора зависит от его температуры вследствие линейного расширения металла обкладок и диэлектрика, а также вследствие зависимости диэлектрической проницаемости от температуры. Зависимость емкости от температуры, как правило, отличается от линейной и нередко принимает довольно сложный вид [5, с. 16]. Чтобы избежать влияния температуры, предлагается использовать дифференциальный емкостный датчик, содержащий два

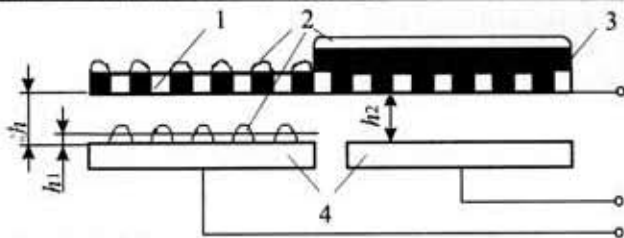


Рис. 4. Дифференциальный емкостный датчик с компенсационным конденсатором:
1 — общая обкладка из сетки; 2 — нанесенный материал; 3 — экран; 4 — сплошные обкладки

конденсатора — сетчатый и компенсационный, которые имеют общую верхнюю обкладку (рис. 4).

Суммарное приращение емкости для данной схемы вычисляется по формуле

$$\Delta C_{\Sigma} = \Delta C_1 + \Delta C_{r1} - \Delta C_{r2} \quad (2)$$

где ΔC_1 — приращение емкости сетчатого конденсатора вследствие осаждения материала;

$\Delta C_{r1}, \Delta C_{r2}$ — температурное изменение емкости сетчатого и компенсационного конденсаторов, соответственно.

Так как изменение температуры такого датчика приведет к приращению емкостей обоих конденсаторов, то изменения ΔC_{r1} компенсируется изменением ΔC_{r2} . Таким образом, устраняется зависимость суммарного приращения емкости ΔC_{Σ} от температуры.

Изменение емкости сетчатого конденсатора ΔC_1 вычисляется по формуле (1).

Температурное изменение емкости сетчатого конденсатора:

$$\Delta C_{r1} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon\Delta L}{\ln \frac{(\Delta L)^2}{2a\Delta h_1} + D} \quad (3)$$

где ΔL — температурное изменение суммарной длины всех проводов, образующих решетку конденсатора.

Температурное изменение емкости компенсационного конденсатора:

$$\Delta C_{r2} = \frac{\epsilon\epsilon_0\Delta S}{\Delta h_2} \quad (4)$$

где ΔS — температурное изменение суммарной длины всех проводов, образующих решетку конденсатора;

Δh_2 — температурное изменение расстояния между обкладками сетчатого конденсатора.

Из формулы (1) можно выразить толщину нанесенной металлической пленки:

$$\Delta h_1 = \frac{L^2}{2a} \left(e^{\frac{2\pi\epsilon_0\epsilon L}{\Delta C} - D} \right)^{-1} \quad (5)$$

Конструкция емкостного датчика, содержащего компенсационный конденсатор, представлена на рис. 5.

Основной датчик является керамическая подложка 1, на которую наносятся медные обкладки конденсаторов 2 и 3. В качестве изолятора 4 между обкладками емкостей и сеткой используется керамическая пластина. Сетка 5 натягивается под действием упругих сил F , чтобы избежать деформации во время эксплуатации датчика. В датчике предусмотрен экран 6,

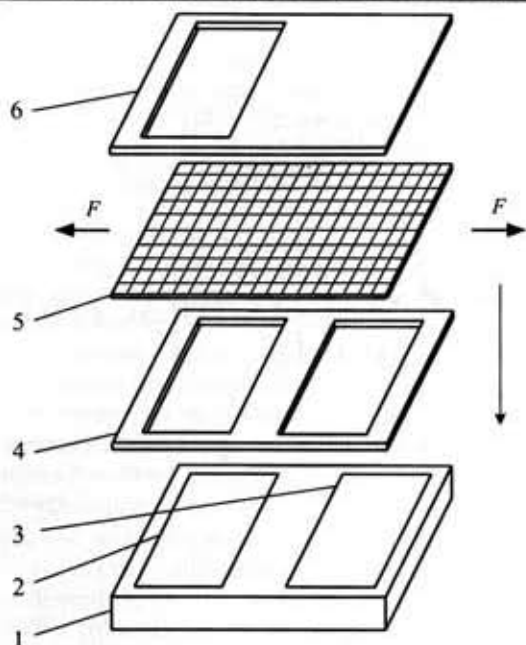


Рис. 5. Конструкция дифференциального емкостного датчика:

1 — керамическая подложка; 2, 3 — медные обкладки конденсаторов; 4 — керамическая пластина; 5 — сетка; 6 — экран который предотвращает запыление краев изолятора 4, а также защищает обкладку 3 компенсационного конденсатора от попадания напыляемого материала.

На рис. 6 и 7 представлены экспериментальные данные, полученные при нанесении меди на датчик с величиной зазора между обкладками 0,5 мм.

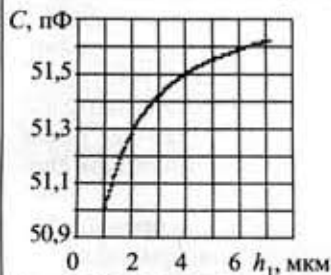


Рис. 6. Зависимость емкости сетчатого конденсатора от толщины наносимого покрытия

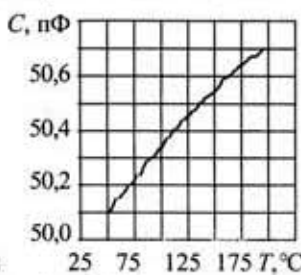


Рис. 7. Температурная погрешность компенсационного конденсатора

Для увеличения чувствительности датчика необходимо по возможности уменьшать расстояние между его электродами, однако с другой стороны, это приводит к уменьшению его ресурса.

Для измерения емкости был выбран прибор АМ-3003 фирмы АКТАКОМ, представляющий собой компактное устройство с возможностью получения информации об измерениях с персонального компьютера (ПК) по интерфейсу RS-232C. Его применение позволило создать автоматизированную систему контроля толщины покрытий (рис. 8).

Автоматизированная система содержит коммутатор, позволяющий производить переключения между измеряемыми конденсаторами. Это обусловлено тем, что прибор АМ-3003 позволяет производить измерения емкости только одного конденсатора. Управление коммутатором происходит с помощью ПК, по-



Рис. 8. Автоматизированная система контроля толщины покрытий

этому известно, какой именно конденсатор используется в качестве измерительного.

Для этой автоматизированной системы разработана программа, которая позволяет задавать параметры датчика для расчета толщины наносимых покрытий, снимать показания с датчика в режиме реального времени и преобразовывать эти данные в отчет для последующего анализа процесса нанесения покрытий.

Использование описанной автоматизированной системы позволяет повысить точность контроля толщины покрытий (погрешность датчика составляет 5% при величине зазора между обкладками 1 мм) и уменьшить минимально контролируруемую толщину до величины менее 1 мкм.

Данная автоматизированная система относится к средствам наблюдения за процессом нанесения покрытий и может быть использована в приборостроении, электронной промышленности и машиностроении для контроля толщины покрытий при их нанесении, например на лопатки газотурбинных двигателей.

Применение емкостного метода в приборостроении для контроля толщины материалов, наносимых на микросхемы, позволит контролировать толщину пленки как из диэлектрических, так и из металлических материалов с достаточно высокой точностью. Существенным преимуществом емкостного датчика является его дешевизна при изготовлении.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Матис И. Т. Электроемкостные преобразователи для неразрушающего контроля. — Рига: Зинатне, 1977.
2. Холлэнд Л. Пленочная микроэлектроника. — М.: Мир, 1968.
3. Пат. 2261416 России. Емкостный способ контроля толщины покрытий, наносимых в вакууме / Козка В. К., Семенов Э. И., Истомин А. С. — 27.09.2005.
4. Иоссель Ю. Я., Кочанов Э. С., Струнский М. Г. Расчет электрической емкости. — Л.: Энергониздат, 1981.
5. Гусев В. Н., Смирнов В. Ф. Электрические конденсаторы постоянной емкости. — М.: Сов. радио, 1968.

Б. П. ПОЛОЗОВ, к. ф.-м. н. О. А. ФЕДОРОВИЧ, В. Н. ГОЛОТЮК,
А. А. МАРИНЕНКО, Д. В. ЛУКОМСКИЙ

Украина, г. Киев, Институт ядерных исследований, ОАО «Квазар»
E-mail: boris@kinr.kiev.ua, interdep@kinr.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
23.11 2005 г.

Оппонент к. т. н. С. И. КРУКОВСКИЙ
(НПП «Карат», г. Львов)

ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ НА СТРУКТУРУ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Предлагаемый комбинированный способ структурирования поверхности пластин фотоэлектрических преобразователей позволяет повысить эффективность фотопреобразования, КПД и величину тока короткого замыкания.

В настоящее время весьма актуальным становится поиск альтернативных источников энергии. Одним из наиболее перспективных источников является энергия солнечного излучения, которая может быть легко преобразована непосредственно в электрическую. Этот источник энергии практически неисчерпаем, а себестоимость произведенной таким способом электроэнергии в ближайшие годы сравнится с себестоимостью электроэнергии, полученной от традиционных источников [1]. В связи с этим разработке и совершенствованию фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) солнечной энергии уделяется очень большое внимание.

Одной из основных характеристик ФЭП является коэффициент полезного действия, который в итоге и характеризует генерируемую мощность. В настоящее время КПД отечественных промышленных образцов составляет около 12%. Проблема увеличения КПД остается одной из наиболее актуальных при разработке новых и совершенствовании существующих конструкций ФЭП, тем более что максимальный КПД западных аналогов редко превышает 15%.

Эффективность фотопреобразования кремниевых ФЭП зависит от многих факторов, в том числе от качества используемого кремния и от электрических и оптических потерь при преобразовании энергии излучения.

При промышленном производстве ФЭП для снижения оптических потерь широко применяется структурирование их поверхности. Обычно структура поверхности создается при помощи спонтанного анизотропного химического травления в горячих щелочных растворах, при котором на поверхности кремниевых пластин образуется текстура из четырехгранных пирамид, направленных вершинами вверх. Это позволяет получить следующие существенные преимущества [2]:

1) снижается коэффициент оптического отражения от поверхности ФЭП;

2) поглощение фотонов происходит ближе к области пространственного заряда из-за их перпендикулярного вхождения в объем полупроводника.

Проведенные исследования показали, что серийные текстурированные в щелочных растворах пластины имеют коэффициент оптического отражения около 10% [3]. Последующее формирование микрорельефа на поверхности пирамид текстуры позволит дополнительно снизить отражение от поверхности ФЭП и, соответственно, увеличить их КПД и величину тока короткого замыкания.

В настоящее время авторами проводятся исследования химических, электрохимических и плазмохимических методов создания такого микрорельефа. Важнейшим преимуществом плазмохимического травления (ПХТ) перед химическим является то, что ПХТ проходит неселективно к осям кристалла кремния, позволяет относительно точно управлять процессом травления и не требует больших расходов травителя. Поэтому при помощи ПХТ можно проводить дополнительное микроструктурирование пирамид текстуры.

В статье приводятся результаты исследований ФЭП, подвергнутых плазмохимической обработке после структурирования их стандартным химическим способом.

Образцы ФЭП изготавливались по промышленной технологии на основе монокристаллических кремниевых пластин КДБ 1.0 (102,8×102,8 мм и толщиной 300 мкм). Эти пластины подвергались обработке в плазмохимическом реакторе (ПХР) [4, 5], основной особенностью которого является использование высокочастотных разрядов (13,56 МГц) в скрещенных магнитных полях, что позволяет регулировать энергию ионов и работать при энергиях химически активных ионов ниже 200 эВ.

Плазмохимическое травление образцов в плазме низкоэнергетичными ионами позволяет получить поверхность без радиационных повреждений и избежать перераспыления на поверхность ФЭП материалов, из которых изготовлен плазмохимический реактор. Кроме этого, наличие магнитных полей дает возможность получить более высокую степень диссоциации молекул рабочего газа и ионизации атомов и, соответственно, реализовать более высокие скорости травления материалов, используемых в микроэлектронике.

Плазмохимическое травление проводилось с использованием основного рабочего газа SF₆ (элегаз) с

добавлением кислорода (до 10%). При энергии химически активных ионов фтора до 200 эВ и разрядном токе в плазме 14 А была получена скорость травления кремния до 1,5 мкм/мин. Давление смеси рабочих газов в реакторе составляло 0,05—0,10 мм рт. ст.

При травлении пластин ФЭП проводились масс-спектрометрические исследования химических процессов, происходящих в плазме. Для этого использовался времяпролетный масс-спектрометр МХ-7304, в котором имеется собственная ионизационная камера, где также может происходить диссоциация сложных молекул. Поэтому исследования проводились таким образом, чтобы при анализе масс-спектрограмм можно было различать эффекты диссоциации рабочего газа в масс-спектрометре от эффектов в плазмохимическом реакторе.

Методика исследований химически активных газов в ПХР и техника их отбора из разрядной камеры приведены в работе [6]. Согласно этой методике вначале проводились исследования остаточных газов в самом масс-спектрометре, затем записывались спектры остаточных газов в реакторе, спектры газов, образующихся при высокочастотном разряде в камере реактора без травления пластин, и наконец, спектры газов в реакторе при травлении пластин.

На масс-спектрограммах (рис. 1) приводятся результаты исследований масс-спектров при напуске в реактор смеси элегаза с кислородом в соотношении 10/1. Давление газа в масс-спектрометре поддерживалось одинаковым при всех исследованиях и составляло $6,5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Сам анализатор откачивался при помощи электроразрядного насоса, что позволяло удалить пары масел.

На рис. 1, а приведены масс-спектры, полученные при напуске в ПХР смеси газов $SF_6 + 10\% O_2$. Наблюдаются такие ионы радикалов как SF_5^+ , SF_4^+ , SF_3^+ , SF_2^+ , SF^+ , O_2^+ , а также ионы остаточных газов в ПХР — азота (молекулярного и атомарного), кислорода,

воды, водорода. При включении разряда в ПХР масс-спектры кардинально меняются (рис. 1, б) — наряду с отмеченными выше появляются SF_3O^+ , $SF_2O_2^+$, SF_2O^+ , SFO_2^+ , SFO^+ , SO_2^+ , SO^+ . Происходит также перераспределение амплитуд ионов радикалов. Амплитуды ионов кислородсодержащих радикалов достигают, а в некоторых случаях и превышают амплитуды пиков радикалов SF_4^+ , SF_3^+ , SF_2^+ . Добавка кислорода в небольших количествах в плазму SF_6 за счет реакций замещения освобождает атомы фтора из радикалов, увеличивая тем самым скорость травления материалов [6].

Травление в ПХР пластин кремния с общей площадью поверхности 68 см² привело к практически полному использованию радикалов, наблюдаемых ранее: на спектрограмме (рис. 1, в) наблюдаются в основном только продукты реакции фтора с кремнием SiF_4^+ , SiF_3^+ , SiF_2^+ . Присутствуют также продукты взаимодействия кислорода с серой в разряде SO_2^+ , SO^+ . Пик атомарной серы совпадает с пиком кислорода O_2^+ , поэтому различить их нельзя. Наблюдается также пик HF^+ , который, вероятно, получается в результате взаимодействия водорода с SiF_4 ($2SiF_4 + H_2 \rightarrow 2SiF_3 + 2HF$) — основным летучим соединением при травлении кремния, пик которого на спектрограмме имеет очень маленькую амплитуду.

Следует отметить, что SiF_4^+ практически не наблюдается и другими авторами [7, 8].

Было обработано более 20 пластин при различных напряжениях автосмещения (120—200 В), составах рабочего газа, температурах охлаждения и с различным временем травления. При этом скорость травления одной пластины размерами 102,8×102,8 мм изменялась от 0,3 до 1,5 мкм/мин.

Изменения структуры поверхности кремниевых пластин после их обработки в ПХР исследовались на электронном микроскопе при увеличении от 2000 до 20000 раз и угле наклона пластин 25°.

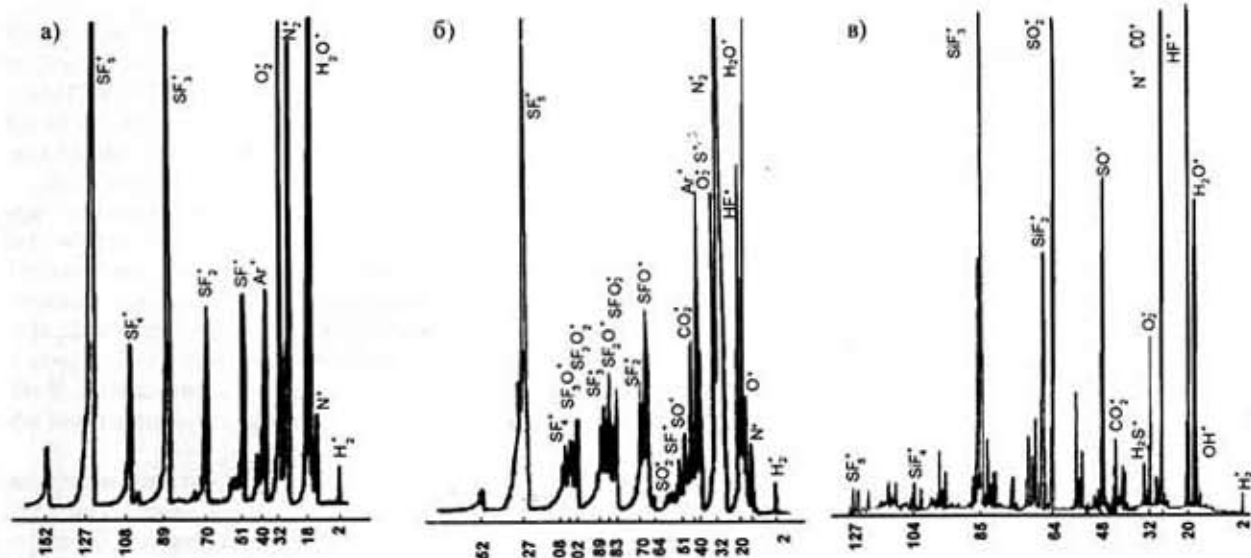


Рис. 1. Масс-спектрограммы, полученные в плазмохимическом реакторе (давление газа в ПХР $5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст., ток разряда 14 А, напряжение автосмещения 200 В)

а — после напуска рабочего газа $SF_6 + 10\% O_2$; б — во время разряда в реакторе; в — при травлении кремниевых пластин ФЭП

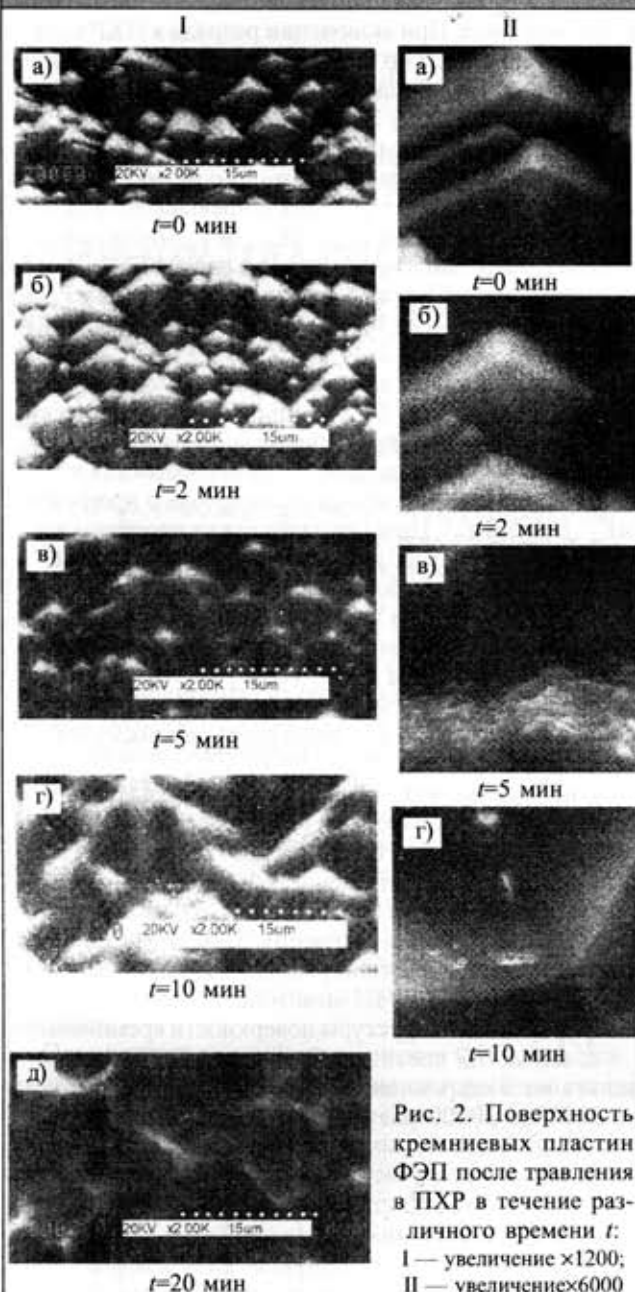


Рис. 2. Поверхность кремниевых пластин ФЭП после травления в ПХР в течение различного времени t : I — увеличение $\times 1200$; II — увеличение $\times 6000$

Наблюдения показали, что поверхность пластин при плазмохимическом травлении претерпевает существенные изменения.

На рис. 2 приведены изображения поверхности пластины, полученной стандартным химическим травлением в 50%-ном растворе KOH, до и после травления в рабочем газе SF₆+10%O₂ с временем экспозиции от 2 до 20 мин. После двухминутной экспозиции наблюдается небольшое стравливание острых вершин структуры и появление неровностей на гранях четырехгранных призм, которые можно заметить только при более сильном увеличении. После пятиминутной экспозиции структура изменяется более существенно — острые вершины стравливаются, а грани становятся достаточно шероховатыми. Увеличение времени травления кремниевой пластины в ПХР до 10 мин приводит к еще большему сглаживанию вершин и к более глубокому травлению впадин между призмами — струк-

тура кремния сильно меняется, поверхность становится более развитой. При этом упорядоченные структуры, которые были получены при химическом травлении, практически исчезают, а грани четырехгранных пирамид из плоских становятся сильно шероховатыми.

На рис. 3 приведены изображения участка поверхности пластины ФЭП после 10-минутной обработки в ПХР, полученные при разном увеличении. Видно существенное изменение граней пирамид и появление мелкой структуры на поверхности кремния, что приводит к увеличению площади поверхности ФЭП.

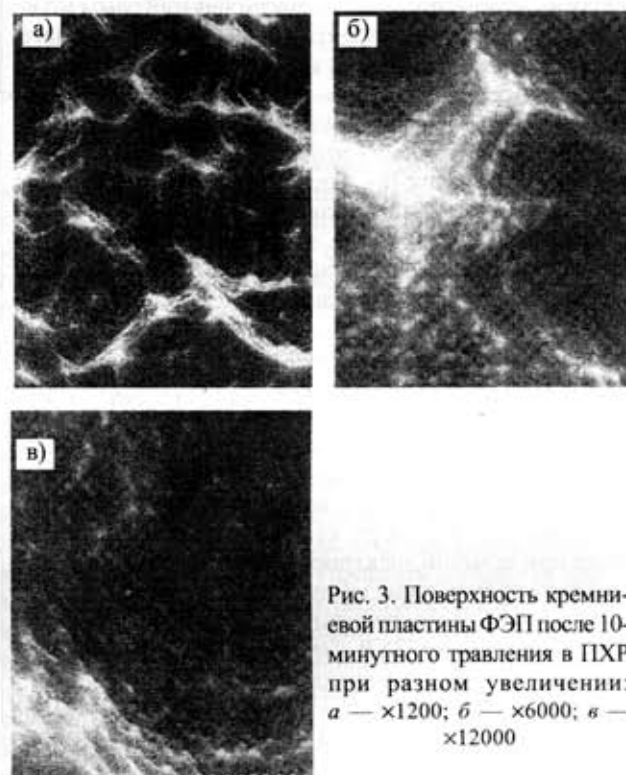


Рис. 3. Поверхность кремниевой пластины ФЭП после 10-минутного травления в ПХР при разном увеличении: а — $\times 1200$; б — $\times 6000$; в — $\times 12000$

При времени экспозиции 20 мин разность высот углублений и возвышений, как показали измерения на микроинтерферометре Линника МИИ-4, достигает 15—18 мкм и более. В таком случае для изучения структуры поверхности по всей глубине уже не хватает глубины резкости электронного микроскопа.

Из обработанных ПХТ пластин были изготовлены ФЭП и измерены основные параметры 15 образцов — коэффициент полезного действия (η), ток короткого замыкания ($I_{кз}$) и напряжение холостого хода ($U_{хх}$). Зависимости этих параметров от времени травления пластин в плазме показаны на рис. 4. Среднее значение тока короткого замыкания для образцов ФЭП после стандартной промышленной обработки составляет 3,25 А.

Из приведенных графиков видно, что при непродолжительном травлении (до 2 мин) $I_{кз}$ возрастает на 5,5%, а при увеличении времени экспозиции до 20 мин — уменьшается на 6,7%. Максимальные значения КПД ФЭП также приходится на короткие экспозиции, увеличиваясь с 12% до 13%. И хотя $U_{хх}$ при малых экспозициях несколько снижается, увеличение $I_{кз}$ сви-

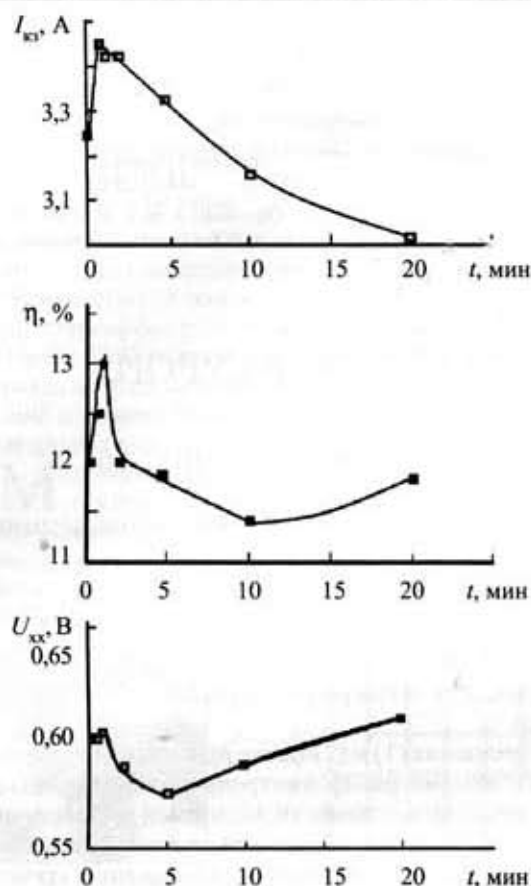


Рис. 4. Зависимости характеристик ФЭП от времени травления пластин в ПХР (ток разряда 14 А, напряжение смещения 200 В)

детельствует о наличии хорошего омического контакта серебра с кремниевой подложкой.

Ухудшение характеристик ФЭП при экспозиции в плазме более 5 мин можно объяснить тем, что при обычном, химическом, травлении глубина травления составляет 6—7 мкм и на нее рассчитана стандартная технология вжигания проводящих покрытий серебра и алюминия. Увеличение глубины впадин (до 20 мкм при обработке в плазме в течение 20 мин) приводит к невозможности создания сплошного проводящего покрытия и, соответственно, к уменьшению тока короткого замыкания и КПД, несмотря на максимально развитую поверхность ФЭП.

Таким образом, предлагаемый способ структурирования поверхности кремниевых пластин фотоэлектрических преобразователей, сочетающий обычное химическое травление с плазмохимическим, позволяет повысить эффективность фотопреобразования ФЭП, а также более гибко управлять рельефом поверхности.

Степень и характер изменений рельефа при плазмохимическом травлении зависят от многих факторов — времени обработки, разрядного тока в плазме, энергии ионов, давления и состава рабочего газа, температуры охлаждающей жидкости и др. Для получения максимальных значений основных характеристик ФЭП необходимо проводить поиск оптимальных режимов обработки.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Archer M. D., Hill R. Clean electricity from photovoltaic. — London: Imperial College Press, 2001.
2. Николаенко Ю. Е., Вакив Н. М., Круковский С. И. и др. Состояние и тенденции развития твердотельных фотопреобразователей солнечной энергии // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2001. — № 3. — С. 21—30.
3. Ленков С. В., Лукомский Д. В., Ликов О. I., Зубарев В. В. Підвищення ефективності кремнієвих фотоелектричних перетворювачів за допомогою текстурування їх поверхні // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. — Одеса. — 2004. — № 2. — С. 58—62.
4. Коновал В. М., Усталов В. В., Федорович О. А. Плазмохимический реактор с замкнутым дрейфом электронов для производства элементов с субмикронными размерами // Материалы 6-й Междунар. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — Севастополь. — 1996. — С. 285—287.
5. Усталов В. В., Федорович О. А., Вдовенков А. А., Левицкая С. К. Плазмохимический реактор с низкой энергией ионов для селективного травления материалов // Материалы 10-й Междунар. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — Севастополь. — 2000. — С. 434—435.
6. Костин Е. Г., Усталов В. В., Федорович О. А. Масс-спектрометрические исследования химически активной плазмы высококачественных разрядов в управляемых магнитных полях // Збірн. наук. праць Інституту ядерних досліджень. — 2004. — № 2. — С. 86—95.
7. Плазменная технология в производстве СБИС / Под ред. Н. Айнспрука и Д. Брауна. — М.: Мир, 1987.
8. Данилин Б. С., Киреев В. Ю. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. — М.: Энергоатомиздат, 1987.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Голубь Б. И., Котюк А. Ф., Кузин А. Ю. Основы обеспечения единства оптико-физических измерений. — М: Горячая линия — Телеком, 2005. — 151 с.

Приведены основы обеспечения единства оптико-физических измерений величин, характеризующих некогерентное и когерентное оптические излучения. Особое внимание уделено методам и средствам воспроизведения единиц и передачи их размеров в спектрометрии, фотометрии, колориметрии, спектрофотометрии, поляриметрии, а также измерениям величин, характеризующих непрерывное и импульсное лазерные излучения.

Для инженерных и научных работников в области техники оптических измерений; будет полезна студентам, обучающимся по направлениям «Стандартизация, сертификация и метрология», «Оптотехника».



Д. ф.-м. н. В. В. НОВИКОВ, Н. О. ДМИТРИЕВА, А. В. НОВИКОВ

Украина, Одесский национальный политехнический университет
E-mail: novikov@te.net.uaДата поступления в редакцию
14.11 2005 г.Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН
(ЦКБ «Ритм», г. Черновцы)ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ
НАНОКОМПОЗИТОВ С ХАОТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

На основе фрактальной модели хаотической структуры неоднородного материала определена обобщенная проводимость порошкового композиционного материала. Проведено сравнение с экспериментом и с расчетами для модели эффективной среды.

В радиоэлектронике, приборостроении, вычислительной технике широко используются топологически-неупорядоченные материалы, сегнетокерамика, неупорядоченные твердые тела, халькогенидные стеклообразные полупроводники — неорганические полимеры с полностью ковалентными химическими связями и статистически равномерным распределением структурных стеклообразующих комплексов, стекла с наноразмерной топологической неупорядоченностью, керамические материалы с микроразмерной топологической неупорядоченностью.

Прогнозирование диэлектрических свойств таких материалов является важной задачей при создании новой техники. Вместе с тем результаты многих экспериментальных исследований диэлектрических свойств неупорядоченных сред не согласуются между собой.

Точное и полное описание эффективных свойств композита может быть получено, если известно детальное распределение физических полей во всех компонентах композита. Задача определения распределения физических полей в компонентах композита с хаотической структурой достаточно сложная, и поэтому при определении эффективных свойств композита используют те или иные допущения [1].

Рассмотрим задачу определения проводимости композитов с хаотической структурой. Вначале кратко остановимся на основных результатах по определению эффективной проводимости композита.

Эффективная проводимость σ и эффективное удельное сопротивление ρ определяются из уравнений

$$\langle j \rangle = \sigma \langle E \rangle, \quad (1)$$

$$\langle E \rangle = \rho \langle j \rangle, \quad (2)$$

где $\sigma \rho = 1$, $\langle j \rangle$, $\langle E \rangle$ — поток носителей заряда и напряженность электрического поля, соответственно, усредненные по объему композита V :

$$\langle j \rangle = V^{-1} \iiint_V j(r) dV, \quad \langle E \rangle = V^{-1} \iiint_V E(r) dV. \quad (3)$$

Для локальных областей композита (компонентов) выполняется

$$\begin{cases} j(r) = \sigma(r) E(r) \\ E(r) = \rho(r) j(r) \end{cases} \quad (4)$$

где $j(r)$, $E(r)$, $\sigma(r)$ и $\rho(r)$ — случайные функции координат.

Уравнения (1) и (2) также применимы и к другим свойствам (например электропроводности, диэлектрической проницаемости, магнитной восприимчивости, диффузии, и т. д.), все они могут быть объединены под общим названием — обобщенная проводимость.

Теоретические исследования обобщенной проводимости неоднородной среды начались с работ, опубликованных еще в 1870—1930 гг. [2—4]. На основе этих работ был разработан метод эффективной среды (метод самосогласованного поля) [5], который, в сущности, представляет замену неоднородной среды, состоящей из двух компонентов с проводимостями σ_1 и σ_2 , сплошной средой с эффективной проводимостью σ .

На основе метода самосогласованного поля была получена формула для эффективной проводимости [5]

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_1 f(a, b), \quad f(a, b) = b + \left(b^2 + \frac{1}{2}a\right)^{\frac{1}{2}}; \\ b &= \frac{(3x-1) + (2-3x)a}{4}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $a = \sigma_2/\sigma_1$, x — концентрация компонента.

Полученные формулы (5) достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными эффективной проводимости σ , если проводимости компонентов композита (σ_1 , σ_2) отличаются не более чем на два порядка ($10^{-2} < \sigma_2/\sigma_1 < 1$) или при малых концентрациях одного из компонентов (например, $p \ll 1$). Если отношение свойств системы $\sigma_2/\sigma_1 < 10^{-2}$, то расчеты по (5) и эксперимент сильно отличаются [6—9].

Если отношение свойств системы $\sigma_2/\sigma_1 \rightarrow 0$, то для прогнозирования эффективной проводимости композита можно использовать результаты теории перколяции [6—8].

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= (x - x_c)^t \text{ при } (x - x_c) > 0; \\ \sigma &= (x_c - x)^s \text{ при } (x - x_c) < 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где t и s — критические индексы проводимости ($t=s=1,1$ для двухмерных систем ($d=2$) и $t=1,6-2, s=0,6$ для трехмерных систем ($d=3$));

x_c — порог перколяции.

Если свойства системы лежат в диапазоне $0 < \sigma_2 / \sigma_1 < 10^{-2}$, то до настоящего времени не существовало достаточно строгой теории, которая позволяла бы прогнозировать эффективную проводимость неоднородной среды. Ниже сделана попытка решить эту задачу, опираясь на идеи метода ренормгрупповых преобразований и теорию фракталов, которую еще называют геометрией хаоса.

Моделирование хаотической структуры композита было проведено на базе решетки со случайным распределением ее параметров. Узлы решетки моделировали неоднородности (компоненты системы) в пространстве, а связи между узлами — контакты между соседними неоднородностями (рис. 1).

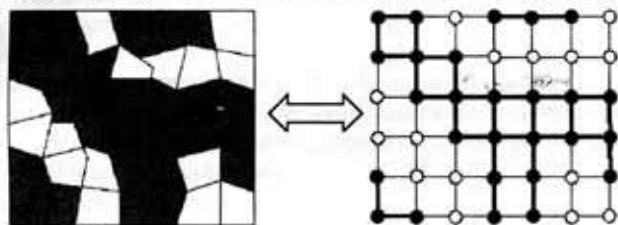


Рис. 1. Моделирование хаотической структуры композита

В [10] изучали хаотические фрактальные множества на квадратных решетках, в которых все связи были случайно окрашены на начальной стадии и беспорядочно изменили свой цвет на более поздних стадиях. Эти хаотические фрактальные множества Ω_f зависели от начального размера решетки l_0 и от вероятности быть окрашенными в определенный цвет, например черный x_0 (цвет связи означает, что она обладает определенными свойствами).

Рост фрактального множества был начат на решетке конечного размера $l_0 \times l_0$, а затем каждая связь этой решетки в k -м итерационном шаге была заменена решеткой, полученной на предыдущем, $k-1$ -м шаге. Рост считали законченным после того, как свойства фрактального множества стали независимыми от линейного масштаба $l_n = l_0^n$ (рис. 2).

Рассмотрим множество связей $\Omega_n(l_0, x_0)$, где каждая связь окрашена в черное с вероятностью x_0 и белое с вероятностью $1-x_0$. В этом случае можно провести различие между двумя основными состояниями, в которых черные связи формируют соединяющее множество (СМ), связывающее пространство решетки между противоположными сторонами, или несоединяющее множество (НСМ), для которого не существует траектории, состоящей из черных связей, таких, которые соединяют две противоположных стороны решетки.

Важной характеристикой хаотического фрактального множества $\Omega_n(l_0, x_0)$ есть вероятность $Y(l_0, x_0)$ того, что данная конфигурация принадлежит СМ. Эта вероятность зависит от концентрации «черных» связей x_0 и от начального размера l_0 решетки и может

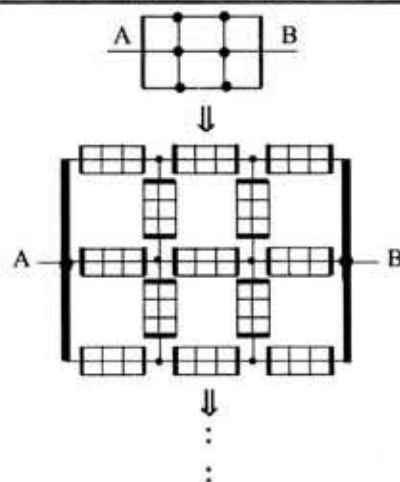


Рис. 2. Иллюстрация построения фрактального множества на прямоугольных решетках 2×3

быть определена как отношение числа соединяющих конфигураций к общему количеству возможных конфигураций.

На первом итерационном шаге длина ребра решетки равна

$$l_1 = l_0^2, \quad (7)$$

а плотность «черных» связей равна

$$x_1 = Y(l_0, x_0). \quad (8)$$

В последующих шагах длина ребра решетки равна

$$l_n = l_0^{l_{n-1}}. \quad (9)$$

Вероятность принадлежности связи к СМ будет зависеть от x следующим образом:

$$\begin{aligned} x_2 &= Y(l_1, x_1), \\ \dots \end{aligned} \quad (10)$$

$$x_n = Y(l_{n-1}, x_{n-1}).$$

При этом выполняется

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \begin{cases} 1, & x_0 > x_c; \\ 0, & x_0 < x_c. \end{cases} \quad (11)$$

Неустойчивая критическая точка (порог перколяции) x_c может быть определена из равенства

$$x_c = Y(l_0, x_c). \quad (12)$$

В любых практических вычислениях (с конечной точностью) траектория роста хаотического фрактального множества $\Omega_n(l_0, x_0)$ заканчивается на n -м итерационном шаге, достигающем точки, неразличимой от одной из неподвижных точек 0 или 1 функции $Y(l_0, x_0)$.

Рассмотрим зависимость функции $Y(x)$ вероятности от концентрации x при заданном значении начального размера l_0 решетки. На основе функции вероятности $Y(x)$ можно определить плотность вероятности распределения $f(x)$ протекающих конфигураций:

$$Y(x) = \int f(x) dx. \quad (13)$$

При этом, используя производную $Y(x)$ в пределе перколяции

$$\left. \frac{dY}{dx} \right|_{x=x_c} = \lambda, \quad (14)$$

где $\lambda = f(x)|_{x=x_c}$, можно определить тип неподвижной точки: если $\lambda > 1$, неподвижная точка является неустойчивой; если $\lambda < 1$, неподвижная точка является устойчивой.

Порог перколяции $x = x_c$ (неподвижная точка для функции $Y(x)$) является неустойчивой точкой, т. к. $Y(x)$ соответствует $\lambda > 1$ (точки $x=0, 1$ являются устойчивыми точками).

Плотность СМ $P_{CM}^{(n)}(x_0)$ определяет вероятность того, что связь принадлежит СМ на n -м итерационном шаге и рассчитывается следующим образом:

$$P_{CM}^{(n)}(x_0) = \prod_{i=0}^n Y(x_i). \quad (15)$$

Уравнение (15) показывает, что "черная" связь принадлежит СМ («бесконечному» кластеру) только тогда, когда она принадлежит кластеру, соединяющему две противоположные стороны решетки на каждом итерационном шаге $i=1, \dots, n$.

Из уравнений (11) и (15) следует, что

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P_{CM}^{(n)}(x_0) = \begin{cases} P_{CM}(x_0) > 0 & \text{при } x_0 > x_c; \\ 0 & \text{при } x_0 < x_c; \end{cases} \quad (16)$$

Таким образом, знание функции $Y(x)$ критично для определения свойств фрактальной модели. Для малых начальных решеток эта функция может быть рассчитана точно. Исследования фрактальных множеств, полученных на затравочных ячейках в виде квадрата $l_0=2, 3, 4$, а также и для общего случая прямоугольных ячеек $l_x \times l_y$, были проведены в [11].

Для иллюстрации влияния функции $Y(x)$ на расчет эффективной проводимости композита σ была использована функция вероятностей $Y(x)$ [11]:

$$Y(x) = 5x^2(1-x)^{12} + 68x^3(1-x)^{11} + 398x^4(1-x)^{10} + 1298x^5(1-x)^9 + 2575x^6(1-x)^8 + 3288x^7(1-x)^7 + 2977x^8(1-x)^6 + 2000x^9(1-x)^5 + 1001x^{10}(1-x)^4 + 364x^{11}(1-x)^3 + 91x^{12}(1-x)^2 + 14x^{13}(1-x) + x^{14}. \quad (17)$$

Согласно (16) и (17), перколяционный порог x_c для $Y(x)$ равняется 0,178..., т. е. НСМ переходит в СМ при $x_c=0,178$. (18)

Значение производной $Y(x)$ в точке $x=x_c$ равно

$$f(x)|_{x=x_c} = \lambda, \quad (19)$$

где

$$f(x) = dY(x)/dx. \quad (20)$$

Из этого следует, что

$$\lambda \approx 1,9578. \quad (21)$$

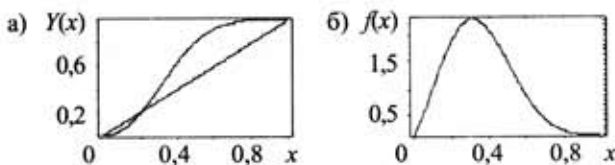


Рис. 3. а — функции вероятностей $Y(x)$; б — производные $f(x)=dY(x)/dx$

Нами были построены функции вероятностей $Y(x)$ на основе прямоугольных решеток [10]. Зависимости функций $Y(x)$ и их производных $f(x)$ от концентрации x представлены на рис. 3.

Рассмотрим двухфазную систему с функцией распределения

$$P_0(C) = (1-x_0)\delta(C-C_2^{(0)}) + x_0\delta(C-C_1^{(0)}), \quad (22)$$

где $\delta(x)$ — функция Дирака;

x_0 — вероятность того, что данная локальная область обладает свойством $C_1^{(0)}$ (черный цвет);

$1-x_0$ — вероятность того, что данная локальная область обладает свойством $C_2^{(0)}$ (белый цвет).

После k шагов ренормгрупповых преобразований функция плотности принимает вид

$$P_k(C) = (1-x_k)\delta(C-C_2^{(k)}) + x_k\delta(C-C_1^{(k)}). \quad (23)$$

Здесь

$$x_k = Y(x_{k-1}, l_{k-1}). \quad (24)$$

Мы выделяли два вида множеств конфигураций связей СМ и НСМ.

Плотность СМ связей равна отношению числа СМ к числу всех разбросов («раскрасок») на квадратной решетке.

В качестве модели СМ и НСМ использовалась ячейка «куб в кубе» (рис. 4). Поэтому на каждом шаге итерационного процесса вычисления свойств структуры СМ и НСМ моделировались ячейкой «куб в кубе»: СМ — непрерывный массив из «хорошо проводящей» фазы (внешний куб) с включением куба из «плохо проводящей фазы» (внутренний куб); НСМ — непрерывный массив из «плохо проводящей фазы» (внешний куб) с включением куба из «хорошо проводящей фазы» (внутренний куб).

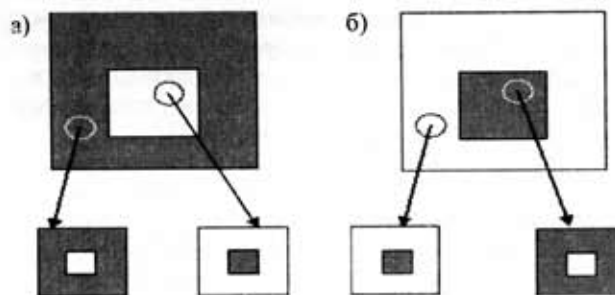


Рис. 4. Модель (а) СМ и (б) НСМ

Проводимость ячейки «куб в кубе» была определена в [11, 12]. Полученный в [1, 11, 12] результат для ячейки, в которой куб с проводимостью σ_1 находится в кубе с проводимостью σ_2 можно записать в виде

$$\sigma = \frac{\sigma_1}{2}(\psi_1 + \psi_2), \quad (25)$$

где

$$\psi_1 = \frac{\sigma_1 + (\sigma_2 - \sigma_1)(1-x)^{2/3}}{\sigma_1 + (\sigma_2 - \sigma_1)(1-x)^{2/3} [1 - (1-x)^{1/3}]};$$

$$\psi_2 = \frac{\sigma_2 + (\sigma_1 - \sigma_2)(1-x)^{1/3} [1 - (1-x)^{2/3}]}{\sigma_2 + (\sigma_1 - \sigma_2)(1-x)^{1/3}}. \quad (26)$$

Здесь x — объемная концентрация фазы с проводимостью σ_1 .

$$\sigma_c^{(k)} = \frac{\sigma_c^{(k-1)}}{2} (\Psi_{1c}^{(k-1)} + \Psi_{2c}^{(k-1)}), \quad (27)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{1c}^{(k-1)} &= \frac{\sigma_c^{(k-1)} + (\sigma_n^{(k-1)} - \sigma_c^{(k-1)}) (1-x_{k-1})^{2/3}}{\sigma_c^{(k-1)} + (\sigma_n^{(k-1)} - \sigma_c^{(k-1)}) (1-x_{k-1})^{2/3} [1-(1-x_{k-1})^{1/3}]} \\ \Psi_{2c}^{(k-1)} &= \frac{\sigma_n^{(k-1)} + (\sigma_c^{(k-1)} - \sigma_n^{(k-1)}) (1-x_{k-1})^{1/3} [1-(1-x_{k-1})^{2/3}]}{\sigma_n^{(k-1)} + (\sigma_c^{(k-1)} - \sigma_n^{(k-1)}) (1-x_{k-1})^{1/3}} \end{aligned} \right\} (28)$$

$\sigma_c^{(0)} = \sigma_1$, $\sigma_n^{(0)} = \sigma_2$ и $x=x_0$ — объемная концентрация фазы с проводимостью σ_1 .

Для определения проводимости НСМ $\sigma_n^{(k)}$ необходимо заменить индексы следующим образом: $n \leftrightarrow c$ и $(1-x_k) \rightarrow x_k$.

Нижние индексы n, c означают, что данная величина относится: n — к НСМ; c — к СМ; верхний индекс k указывает номер итерационного шага.

Итерационная процедура продолжается до тех пор, пока эффективная проводимость композита σ не будет равна

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \sigma_c^{(k)} = \lim_{k \rightarrow \infty} \sigma_n^{(k)} = \sigma. \quad (29)$$

Расчеты проводились для двухкомпонентной среды. На рис. 5 представлено сравнение результатов расчета эффективной проводимости с помощью итерационного метода с расчетом по формуле (5), полученной на основе модели эффективной среды. Сравнение показывает на достаточно хорошее их согласование, если $\sigma_2/\sigma_1 > 10^{-2}$. Если $\sigma_2/\sigma_1 \leq 10^{-2}$, расчеты существенно различаются при концентрациях $0,1 < x < 0,5$, и расхождение растет при $\sigma_2/\sigma_1 \rightarrow 0$.

На рис. 6 и 7 представлено сравнение результатов расчета (при $\sigma/\sigma_1 = 10^{-5}$ и $\sigma/\sigma_1 = 10^{-3}$) по итерационному методу, методу самосогласованного поля и по численному моделированию [13, 14]. Сравнение показывает хорошее согласие итерационного метода с численным экспериментом и существенное расхождение метода самосогласованного поля с численным экспериментом. Данное расхождение ранее было отмечено в [13, 14].

Таким образом, разработанный итерационный метод расчета можно использовать для прогнозирования обобщенной проводимости неоднородных материалов с хаотической структурой при любых значениях проводимости фаз σ_1 и σ_2 и во всем диапазоне концентраций $0 \leq x \leq 1$.

Как было отмечено ранее, в [10] были исследованы свойства фрактальных множеств, образованных на различных затравочных ячейках $l_0 \times l_0$: 2×1 , 2×2 , 2×3 , 2×4 , 3×1 , 3×2 , 3×3 , 3×4 , 4×1 , 4×2 , 4×3 , 4×4 . Для этих решеток были определены функции $Y(l_0, x_0)$ и определены критические индексы. Полученные результаты для фрактальных множеств могут быть использованы при анализе зависимости проводимости

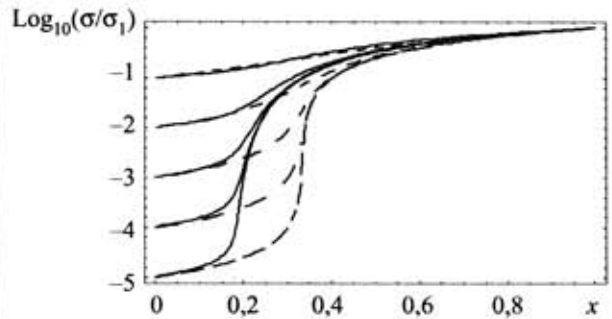


Рис. 5. Сравнение результатов расчета эффективной проводимости с помощью итерационного метода (сплошная линия) с расчетом на основе модели эффективной среды (пунктир) при значениях σ/σ_1 10^{-5} ; 10^{-4} ; 10^{-3} ; 10^{-2} ; 10^{-1}

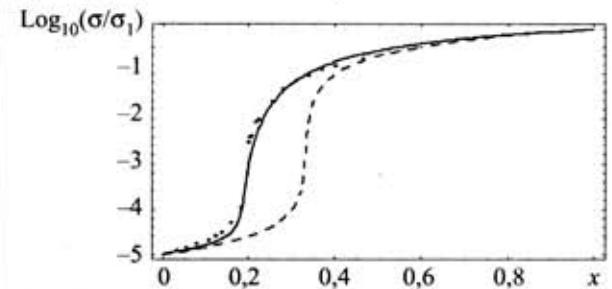


Рис. 6. Сравнение результатов расчета эффективной проводимости (при $\sigma/\sigma_1 = 10^{-5}$) по итерационному методу (сплошная линия) с расчетом на основе метода самосогласованного поля (пунктир) и с экспериментальными данными (точки) [13, 14]

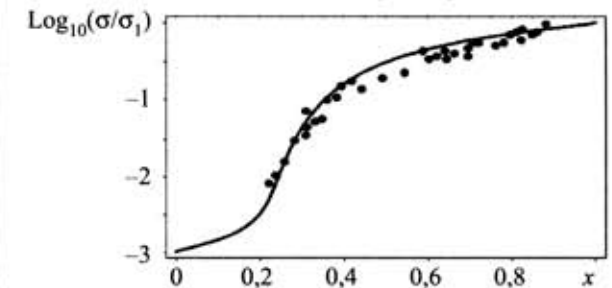


Рис. 7. Сравнение результатов расчета (при $\sigma/\sigma_1 = 10^{-3}$) по методу итерационных усреднений (сплошная линия) с экспериментальными данными (точки) [13, 14]

композита не только от свойств компонентов и их концентраций, но и от такой характеристики структуры композита как фрактальная размерность.

Заключение

Построены хаотические фрактальные множества на прямоугольных решетках, которые могут быть использованы при прогнозировании эффективной проводимости композитов.

Предложен алгоритм определения эффективной проводимости композиционного материала на основе фрактальной модели случайной структуры композита и итерационного метода осреднения. Сравнение расчета и экспериментальных данных, показало достаточно хорошее их согласование при отношении проводимости фаз $\sigma_2/\sigma_1 > 10^{-2}$.

Результаты работы позволяют прогнозировать обобщенную проводимость нанокompозитов с хаотической структурой при любых значениях проводимости фаз и во всем диапазоне концентраций.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Privalko V. P., Novikov V. V. The science of heterogeneous polymers: structure and thermophysical properties.— New York—Brisbane—Toronto—Singapore: J. Wiley, Chichester.— 1995.
2. Maxwell-Carnett J. C. Treatise on electricity and magnetism // Phil. Trans. R. Soc.— 1904.— Vol. 203.— P. 385—383.
3. Bruggeman D. A. G. Berechnung verschiedener physikalischer konstanten von heterogenen substanzen // Ann. Phys.— 1935.— Vol. 24.— P. 636.
4. Maxwell J. C. A treatise on electricity and magnetism.— Oxford, 1873; Reprint: N. Y.: Dover, 1973.
5. Torquato S. Random heterogeneous materials. Microstructure and macroscopic properties.— N. Y.: Springer, 2002.
6. Stauffer D., Aharony A. Introduction to percolation theory.— London: Talor&Francis, 1992.
7. Sahimi M. Non-linear and non-local transport processes in heterogeneous media: from long-range correlated percolation to

- fracture and materials breakdown // Phys. Reports.— 1998.— Vol. 306.— P. 213—217.
8. Sahimi M. Heterogeneous materials. Vol. I.— Linear transport and optical properties; Vol. II.— Nonlinear and breakdown properties and atomistic modeling.— N. Y.: Springer, 2003.
9. Федер Е. Фракталы.— М.: Мир, 1991.
10. Novikov V. V., Wojciechowski K. W., Privalko V. P. Chaotic fractal models generated by rectangular cells // Computational methods in science and technology.— 2004.— Vol. 10, N 1.— P. 91—100.
11. Jackson J. L. Transport coefficients of composite materials // J. Appl. Phys.— 1968.— Vol. 39, N 5.— P. 2329—2335.
12. Corriell S. R., Jackson J. L. Bounds on transport coefficients of two-phase materials // Ibid.— 1968.— Vol. 39, N 10.— P. 1733.
13. Webman I., Jortner J., Cohen M. Numerical simulation of electrical conductivity in microscopically inhomogeneous materials // Phys. Rev.— 1975.— Vol. 11, N 8.— P. 2885—2892.
14. Webman I., Jortner J., Cohen M. Electronic transport in alkali-tungsten bronzes // Ibid.— 1976.— Vol. 13, N2.— P. 713—724.

И. Б. ВИННИК, к. ф.-м. н. И. В. ГАДЗАМАН, Г. И. КЛЫМ,
к. х. н. О. Я. МРУЗ, д. ф.-м. н. О. И. ШПОТЮК

Украина, г. Львов, НПП "Карат", Национальный ун-т
«Львовская политехника»; Дрогобычский гос. педагогический
ун-т им. Ивана Франко
E-mail: shpotyuk@novas.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
13.12 2005 г.

Оппоненты д. ф.-м. н. Р. М. ПЕЛЕЩАК
(Дрогобыч. гос. пед. ун-т им. Ивана Франко),
д. ф.-м. н. В. В. НОВИКОВ (ОНПУ, г. Одесса)

ПОЛУЧЕНИЕ АЛЮМОМАГНИЕВОЙ КЕРАМИКИ С УЛУЧШЕННЫМИ ВЛАГОЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Получены активные элементы сенсоров влажности с относительно низким сопротивлением и большой влагочувствительностью в диапазоне относительной влажности 33—95%.

Сенсоры влажности (СВ) на основе пористых керамических материалов находят широкое применение в системах контроля и регулирования влажности на предприятиях пищевой, легкой, автомобильной промышленности, в сельском хозяйстве (зернохранилища, теплицы, инкубаторы), в нефте- и газопроводах, медицине, метеорологии, а также в разнообразных средствах бытовой техники. Одним из перспективных материалов для изготовления активных элементов СВ является алюмомагниево-шпинель $MgAl_2O_4$, которая обладает хорошей влагочувствительностью, коротким временем срабатывания на изменение влажности, высокой термической и химической стойкостью [1—3].

С учетом того, что эксплуатационные электрофизические характеристики активных элементов СВ зависят от процессов адсорбции влаги керамикой, возникает актуальная задача создания пористых материалов с контролируемой микроструктурой, а именно, с большой удельной поверхностью и высокой открытой пористостью, а также контролируемым рас-

пределением пор по размерам. С этой целью используют исходные порошки с различной удельной поверхностью и размером частиц (как промышленные, так и приготовленные методами «мокрой» химии или твердофазными реакциями между оксидами) и спекание при различных температурах [1—4].

Ранее нами было изучено влияние удельной поверхности смесей исходных порошковых материалов $MgO:Al_2O_3$, взятых в молярном соотношении 1:1, на электрические свойства керамических элементов для СВ [5]. Цель настоящей работы — исследование влияния температуры спекания алюмомагниево-шпинельной $MgAl_2O_4$ на эксплуатационные электрофизические параметры активных элементов СВ на их основе.

Для получения влагочувствительных элементов СВ применяли стандартную керамическую технологию [6]. Эквимолярные количества исходных реагентов (оксидов алюминия Al_2O_3 и магния MgO с величинами удельной поверхности 12,4 и 10,7 m^2/g , соответственно) смешивали в шаровой планетарной мельнице в течение 96 ч в среде ацетона с целью получения высокоактивной смеси. Удельная поверхность приготовленной смеси составляла 89,6 m^2/g . Для получения пресс-порошка в качестве пластификатора использовали водный раствор поливинилового спирта. Двухстороннее прессование осуществляли в стальных пресс-формах.

Пресс-заготовки спекали в печи ВТП-0.1 в нормальных условиях. Использовали четыре температурно-временных режима, существенно отличающихся

Работа поддержана Украинским Научно-технологическим центром (проект 3119).

температурой изотермического спекания T_c , которая составляла 1100, 1200, 1300 и 1400°C. Во всех случаях проводилось нагревание со скоростью 100°C/ч от комнатной температуры до 300°C, далее — нагревание со скоростью 200°C/ч до температуры T_c , выдержка образцов при этой температуре на протяжении 2 ч и последующее охлаждение в режиме выключенной печи. Электрические контакты на плоских поверхностях керамических таблеток формировали методом трафаретной печати с использованием рутениевой пасты. С помощью этой же пасты к контактным площадкам образцов подсоединяли платиновые выводы. Предварительно просушенные слои пасты далее вжигали при температуре 850°C с выдержкой около 10 мин.

Удельную поверхность ρ_s исходных реагентов, их смеси и спеченных образцов керамики измеряли сорбтометром МРР-2 [7]. Как и следовало ожидать, повышение температуры спекания приводит к уменьшению удельной поверхности керамики, причем этот процесс замедляется с ростом T_c (см. таблицу).

Удельная поверхность (ρ_s) и положение максимумов (r_1 , r_2 и r_3) тримодального распределения пор по размерам алюмомагниевого керамики, спеченной при различных T_c

T_c , °C	ρ_s , м ² /г	r_1 , мкм	r_2 , мкм	r_3 , мкм
1100	23,73	0,0028	0,014	0,30
1200	14,00	0,0032	0,028	0,31
1300	8,49	0,0038	0,043	0,32
1400	4,14	0,0026	0,097	0,40

Фазовый состав керамики изучали методом рентгеноструктурного анализа с использованием автоматического дифрактометра HZG-4a (Cu K α -излучение). Экспериментальные данные обрабатывали с применением программы FullProf.2k [8].

Установлено, что реакция образования шпинели из оксидов существенно интенсифицируется с возрастанием температуры спекания T_c . При низких значениях T_c (1100—1200°C) керамика содержит как образовавшуюся из оксидов фазу шпинели MgAl₂O₄ (пр. гр. *Fd-3m*), так и фазы оксидов MgO (пр. гр. *Fm-3m*) и α -Al₂O₃ (пр. гр. *R-3c*). При более высоких температурах (1300—1400°C) керамика содержит, наряду с фазой шпинели, небольшое количество фазы оксида MgO, содержание которой составляет примерно 3,5 и 1,5%, соответственно. Параметр решетки a фазы шпинели составляет 0,80705(4) нм для керамики, полученной при $T_c=1100^\circ\text{C}$. При дальнейшем повышении T_c до 1200°C величина a резко возрастает, и далее этот рост замедляется по мере приближения к $T_c=1400^\circ\text{C}$ (в частности, для керамики, спеченной при этой температуре, параметр a составляет 0,80828(1), что максимально близко к соответствующему значению для стехиометрической шпинели MgAl₂O₄ — $a=0,808$ нм [9]).

Пористую структуру керамики изучали методом ртутной порометрии с использованием прибора POROSIMETR 4000. Полученные результаты свидетельствуют о том, что температура спекания существенно влияет на пористую структуру керамики (рис. 1). Во всех исследуемых образцах проявляется так называемое тримодальное распределение пор по размерам с характерными радиусами r_1 , r_2 и r_3 , численные значения которых приведены в таблице. Установлено, что значение r_1 практически не зависит от T_c , r_2 — отчетливо увеличивается по мере возрастания T_c (при этом сам пик несколько сужается), а r_3 — слабо увеличивается (при этом интенсивность пика тоже возрастает).

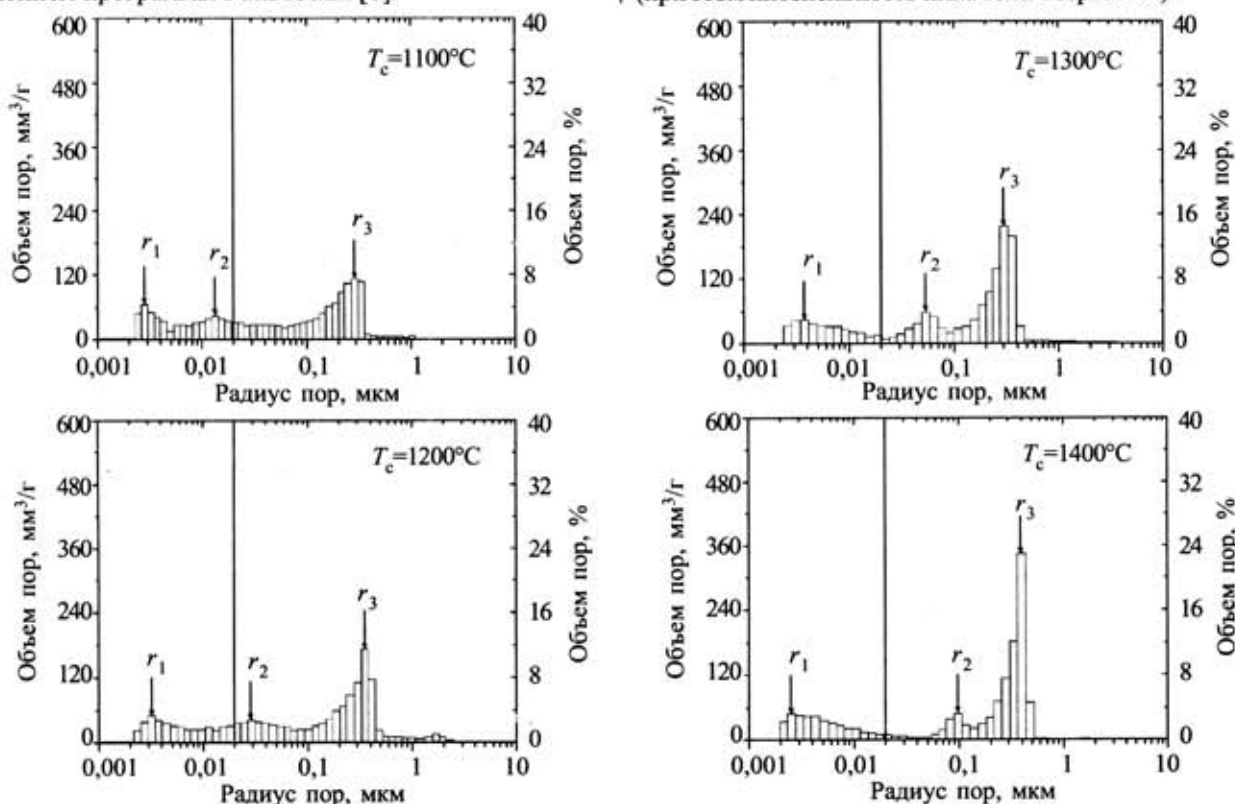


Рис. 1. Распределение пор по размерам в образцах алюмомагниевого керамики, полученных при различной температуре спекания T_c

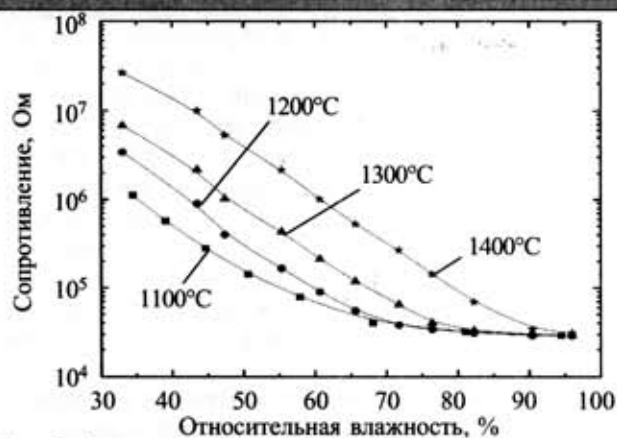


Рис. 2. Зависимость электрического сопротивления от относительной влажности активных элементов СВ на основе алюмомагнетитовой керамики, спеченной при $T_c=1100\text{--}1400^\circ\text{C}$

Влагочувствительность активных элементов СВ на основе исследуемой алюмомагнетитовой керамики оценивали по изменению электрического сопротивления в зависимости от относительной влажности среды. Измерения проводили в камере тепла и влаги PR-3E (Tabai, Япония) при фиксированной температуре 20°C в диапазоне относительной влажности 33—95% с использованием мегаомметра переменного тока МОЦ-0104 при частоте электрического сигнала 500 Гц. Полученные зависимости представлены на рис. 2. Элементы СВ на основе керамики, спеченной при $T_c=1100$ и 1200°C , обладают хорошей чувствительностью (изменение электросопротивления составляет примерно 2 порядка) в диапазоне средних значений относительной влажности (33—70%), но они практически непригодны для работы в диапазоне высоких значений относительной влажности (70—95%). Диапазон влагочувствительности элемента СВ на основе керамики, полученной при $T_c=1300^\circ\text{C}$, расширяется до $\approx 80\%$ относительной влажности. Однако наилучшими характеристиками практически во всем исследованном диапазоне относительной влажности обладает образец СВ на основе керамики, спеченной при $T_c=1400^\circ\text{C}$, для которого изменение электрического сопротивления составляет примерно 3 порядка.

Как известно, влагочувствительность керамики зависит от многих факторов, а именно, собственной удельной электропроводности материала, капиллярной конденсации и поверхностной электропроводности в слоях адсорбированной влаги [1].

По мере повышения T_c сопротивление влагочувствительных элементов возрастает от 10^6 до $2,6 \cdot 10^7$ Ом (при 33% относительной влажности), что объясняется интенсификацией реакции образования основной фазы шпинели MgAl_2O_4 (с характерными свойствами диэлектрика) и соответствующим уменьшением содержания оксидных фаз Al_2O_3 и MgO .

Согласно уравнению Кельвина [1, 2], за процессы капиллярной конденсации влаги в исследованных образцах керамики при температуре 20°C в диапазоне относительной влажности 33—95% ответственны цилиндрические поры с радиусом от 0,001 до 0,02 мкм. Повышение влагочувствительности образцов СВ на основе исследованной керамики, спеченной при $T_c=1400^\circ\text{C}$, по-видимому, связано с достижением

близкого к оптимальному распределения пор по размерам в вышеуказанной области при полном доминировании пор с радиусом r_1 (см рис. 1). Отметим, что во всех исследованных образцах алюмомагнетитовой керамики присутствуют поры и с радиусом больше 0,02 мкм (рис. 1), которые хотя и не участвуют в процессах капиллярной конденсации влаги, но, тем не менее, их наличие необходимо для обеспечения эффективного установления проводимости в объеме всего образца, что, в конечном итоге, приводит к установлению достаточно короткого времени срабатывания функциональных элементов СВ на изменение относительной влажности окружающей среды [2].

Наконец, особенно важно подчеркнуть, что применение высокодисперсных порошков и их смеси с развитой удельной поверхностью ($\rho_{s(\text{смеси})}=89,6 \text{ м}^2/\text{г}$) позволило понизить сопротивление элементов на основе алюмомагнетитовой керамики почти на 2 порядка по сравнению с таковым для ранее полученных элементов из порошков со значительно меньшей удельной поверхностью ($\rho_{s(\text{смеси})}=16,7 \text{ м}^2/\text{г}$) при условии сохранения прочих технологических параметров [5].

Установлено, что повышение температуры спекания от 1100 до 1400°C приводит к понижению удельной поверхности алюмомагнетитовой керамики, интенсификации реакции образования шпинели из смеси исходных оксидов, достижению близкого к оптимальному распределения пор по размерам и, как результат, к повышению влагочувствительности активных элементов сенсоров влажности (изменение сопротивления составляет почти 3 порядка) в диапазоне относительной влажности 33—95%.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Traversa E. Ceramic sensors for humidity detection: the state-of-the-art and future developments // *Sensors and Actuators*.— 1995.— Vol. 23.— P. 135—156.
2. Seiyama T., Yamazoe N., Arai H. Ceramic humidity sensors // *Ibid.*— 1983.— Vol. 4.— P. 85—96.
3. Laobuthee A., Wongkasemjit S., Traversa E., Laine R. M. MgAl_2O_4 spinel powders from oxide one pot synthesis (OOPS) process for ceramic humidity sensors // *J. Eur. Ceram. Soc.*— 2000.— Vol. 20.— P. 91—97.
4. Schreyeck L., Wlosik A., Fuzellier H. Influence of the synthesis route on MgAl_2O_4 spinel properties // *J. Mater. Chem.*— 2001.— Vol. 11.— P. 483—486.
5. Винник И. Б., Сиротюк М. М., Ковальский П. Н., Уварова И. В. Керамические влагочувствительные элементы на основе алюмомагнетитовой шпинели. I. Влияние технологических параметров обработки смесей оксидов MgO и Al_2O_3 на служебные характеристики влагочувствительных элементов // *Порошковая металлургия*.— 1998.— № 5-6.— С. 57—62.
6. Поляков А. А. Технология керамических радиоэлектронных материалов.— М.: Радио и связь, 1989.
7. ГОСТ 23401-78. Порошки металлические, катализаторы и носители. Определение удельной поверхности.
8. Roisnel T., Rodriguez-Carvajal J. WinPLOTR: a windows tool for powder diffraction patterns analysis // In: *Materials Science Forum, Proceedings of the Seventh European Powder Diffraction Conference (EPDIC 7)*.— Barcelona.— 2000.— P. 118—123.
9. Mazzoni A. D., Sainz M. A., Caballero A., Aglietti E. F. Formation and sintering of spinels (MgAl_2O_4) in reducing atmospheres // *Mater. Chem. Phys.*— 2002.— Vol. 78.— P. 30—37.

А. А. БАЛИЦКИЙ

Украина, Львовский национальный университет им. Ивана Франко
E-mail: balitskii@electronics.wups.lviv.uaДата поступления в редакцию
22.11.2005 г.Оппоненты О. Я. МРУЗ
(НПП "Карат", г. Львов),
д. х. н. В. Н. ТОМАШИК
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)ОСОБЕННОСТИ ТОПОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ
СЛОИСТЫХ КРИСТАЛЛОВ In_4Se_3

Шероховатость поверхности практически идеальна для формирования резких гетеропереходов в качестве подложки. Перспективы использования In_4Se_3 в качестве газовых сенсоров не столь обнадеживающие.

Слоистый кристалл In_4Se_3 является перспективным материалом для формирования поляризационно-чувствительных гетероструктур [1, 2]. С другой стороны, поверхность кристалла обладает высокой селективной адсорбционной способностью к монооксиду углерода [3, 4], что позволяет также рассчитывать на использование In_4Se_3 в газовых сенсорах. В обоих случаях топология поверхности кристалла играет определяющую роль в формировании его физических свойств. Однако если в случае использования кристалла в гетероструктурах флуктуации поверхностного рельефа приводят к негативным последствиям (существенно уменьшая "резкость" гетероперехода), то при его использовании в газовых сенсорах шероховатость рельефа заметно увеличивает активную поверхность, а следовательно, и чувствительность активного элемента.

Целью данной работы является исследование топологии поверхности сколов слоистого кристалла In_4Se_3 с точки зрения использования его для элементов нанозлектроники.

В работе исследовались поверхности сколов слоистых кристаллов (100) In_4Se_3 (перпендикулярно кристаллографической оси c), выращенных методом Чохральского из расплава со сверхстехиометрическим (≈ 10 ат. %) индием. Скальвание проводилось непосредственно перед помещением кристалла в высоковакуумную камеру микроскопа. Профили сканирующей туннельной (СТМ) и сканирующей электронной (СЭМ) микроскопии получены с помощью зондового микроскопа Omicron Micro UHV-STM/AFM (в режиме СТМ при постоянном туннельном токе 200 пА) и растрового электронного микроскопа ISM-6100 Scanning Microscope (с энергией электронного пучка 20 кэВ).

На рис. 1 представлена топология поверхности кристалла In_4Se_3 , полученная с помощью растрового электронного микроскопа. Обзорные снимки СЭМ (рис. 1, а, б) указывают на относительно небольшие флуктуации рельефа с незначительным количеством

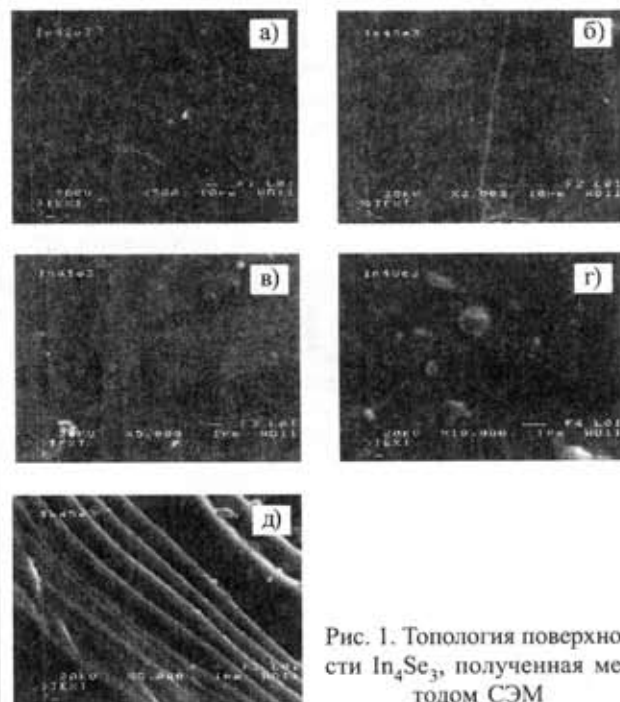


Рис. 1. Топология поверхности In_4Se_3 , полученная методом СЭМ

объемных дефектов (со средней поверхностной концентрацией $2 \dots 3 \cdot 10^{-2}$ мкм⁻²). Также наблюдаются протяженные ступеньки длиной до нескольких сотен микрометров, образованные вследствие одновременного скальвания кристалла по нескольким параллельным плоскостям. На рис. 1, в показана увеличенная правая верхняя область рис. 1, б, содержащая максимальную поверхностную концентрацию объемных дефектов. Видно, что объемные дефекты представляют собой кластерные агрегаты металлического индия (присутствие которого также подтверждено локальным микронзондовым анализом) с разбросом величины поперечного диаметра от 0,01 до 1 мкм. Обнаружена также серия линейных контуров разной интенсивности (см. среднюю часть рис. 1, а), связанных, по всей вероятности, с дефектами упаковки или линейными дислокациями. Увеличение этой области (рис. 1, д) указывает на большое количество (более десятка) параллельных «дислокационных» контуров разной интенсивности. Корректно оценить их размеры не удалось из-за значительного искажения размеров, т. к. в рассеянии электронного пучка в преобладающей степени принимают участие механические напряжения вокруг возникающих дислокаций [5].

Автор благодарит сотрудников Технического университета Дармштадта В. Ягермана и Б. Жекеля за помощь в измерениях СТМ.

Количественный элементный анализ поверхности кристалла In_4Se_3 [4] указывает на существенное преобладание концентрации индия относительно селена по сравнению со стехиометрическим составом. Участков с кластерными агрегатами металлического индия значительно больше, чем участков, связанных с линейными дислокациями, в связи с чем можно предположить, что сверхстехиометрический индий выделяется на поверхности в основном с помощью диффузионного механизма.

СЭМ, обладая относительно небольшим разрешением, тем не менее позволяет наблюдать общую картину расположения дефектов на поверхности. Методики зондовой микроскопии имеют существенно большее разрешение (как в плоскости скола образца, так и по его глубине), ограниченное в основном размерами сканирующего элемента [6]. В случае диэлектриков единственным применимым зондовым методом является атомная силовая микроскопия [7]. Для полупроводников с достаточно низким удельным сопротивлением идеальным является метод СТМ с площадью зонда на порядок меньше.

На рис. 2 представлены профили СТМ поверхности In_4Se_3 . Рисунки *a* и *б* (из разных областей поверхности скола кристалла) зеркально отображают друг друга. Если на одном из них наблюдается довольно упорядоченная (вдоль воображаемых прямых) структура нанокластеров, то на другом — такая же структура “отрицательных” кластеров, нанопор. В таблице приведены характеристики профилей СТМ топографии поверхностей *a* и *б* (\bar{R} — средний радиус, S — средняя площадь кластера (поры), ΔR и ΔS — дисперсии соответствующих величин).

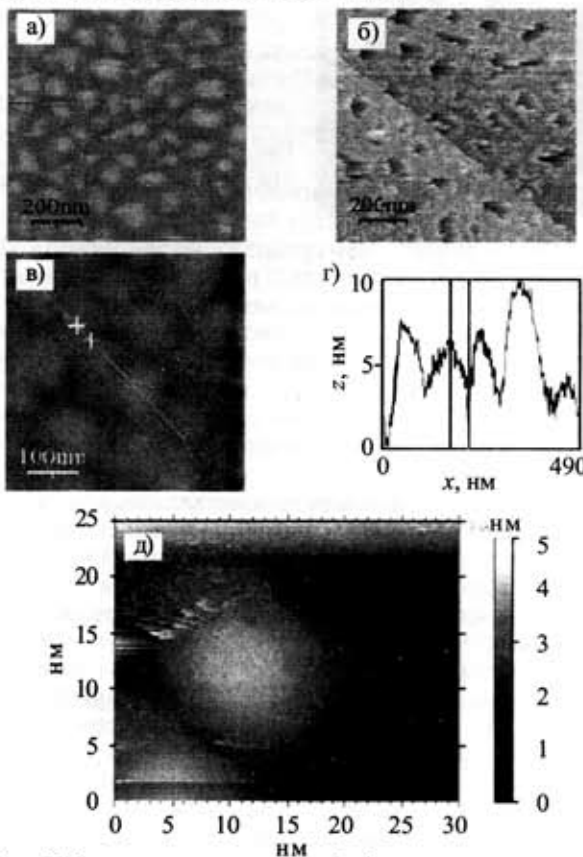


Рис. 2. Топология поверхности In_4Se_3 , полученная методом СТМ

Объекты	\bar{R} , нм	ΔR , нм	\bar{S} , нм ²	ΔS , нм ²
Кластеры, рис. 2, <i>a</i>	32,9	3,4	3317	275
Нанопоры, рис. 2, <i>б</i>	39,9	3,8	5302	426

Из таблицы видно, что нанопоры характеризуются незначительно большими размерами, а обе структуры обладают довольно небольшими дисперсиями как линейных размеров, так и площадей. Что касается поверхности, представленной на рис. 2, *б*, то ее вид внешне очень напоминает участок по линии излома на рис. 1, *б*. Дальнейшее изучение этого участка было невозможно вследствие физического выхода из строя зонда на ранних этапах детализированного сканирования (система обратной связи СТМ не успевала реагировать на резкое изменение вертикальной составляющей рельефа на стенке поры, что приводило к излому остря).

Топология, представленная на рис. 2, *a*, была подвергнута последующей детализированной обработке, что изображено на рис. 2, *в*. На рис. 2, *г* представлена ее вертикальная развертка вдоль прямой на рис. 2, *в* (развертка в двух местах, помеченных на прямой, на рис. 2, *г* отмечена вертикальными линиями). Видно (рис. 2, *г*), что на протяжении значительного участка поверхности ее шероховатость не превышает 5 нм. Максимально детализированный профиль СТМ (полученный на “вершине” кластера) представлен на рис. 2, *д*. На этом участке шероховатость еще меньше (≈ 3 нм). По виду кластер имеет характерные черты застывающего металла, что является подтверждением его физической природы.

Выводы

Исследования поверхности (100) слоистого кристалла In_4Se_3 показали, что с помощью скалывания удастся получить практически идеальную поверхность (в большинстве участков скола), что, в свою очередь, позволяет использовать данный кристалл для разработки элементов наноэлектроники: оцененная шероховатость поверхности практически идеальна для формирования резких гетеропереходов в качестве подложки.

Из-за недостаточной эффективной площади активной поверхности перспективы использования In_4Se_3 в качестве газовых сенсоров не столь обнадеживающи.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Савчин В. П. Поляризация та позиция фоточувствительности гетероструктуры $\text{In}_2\text{O}_3\text{-In}_4\text{Se}_3$ // УФЖ.— 2000.— Т. 45, № 10.— С. 1211—1215.
2. Катеринчук В. Н., Ковалюк М. З., Огородник А. Д. Гетероструктуры на основе селенидов индия // Изв. РАН: Неорг. матер.— 1996.— Т. 32, № 8.— С. 937—940.
3. Balitskii O. A., Savchyn V. P., Jaeckel B., Jaegermann W. Surface characterization of In_4Se_3 single crystals // Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures.— 2004.— Vol. 22, N 4.— P. 921—923.
4. Galiy P. V., Musyanovych A. V. X-ray photoelectron spectroscopy of the interface phase on cleavage surface of the layered semiconductor In_4Se_3 crystals // Functional Materials.— 2005.— Vol. 12, N 3.— P. 467—473.
5. Newbury D. E., Williams D. B. The electron microscope: the material characterization tool of the millennium // Acta Mater.— 2000.— Vol. 48, N 1.— P. 323—346.
6. Wickramasinghe H. K. Progress in scanning probe microscopy // Ibid.— P. 347—358.
7. Панфилов Ю. В., Самойлович М. И., Бульгина Е. В. Нанесение тонких пленок в вакууме на подложки из синтетического опала // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2005.— № 2.— С. 49—52.

Завод телевизионной техники

«Электрон»



— Разработка и производство оптико-электронных систем командного наведения,
— Производство, установка и обслуживание комплексных систем теленаблюдения и охраны объектов и территорий, систем контроля санкционированного доступа, противопожарной сигнализации и оповещения, систем технической защиты информации, включая аппаратно-программные.

— Нанесение гальванических (медь, никель, хром, серебро, палладий, сплав О-Ви, анодирование, твердое анодирование, химическое оксидирование алюминия) и лакокрасочных покрытий малыми сериями на детали из стали, меди, алюминия и их сплавов. Мощные очистительные сооружения и свободные производственные площади позволяют по требованию заказчика внедрить любой гальванический процесс.

— Анализ полимерных материалов, черных и цветных металлов и их сплавов, клеев, масел, лаков и эмалей, а также санитарно-гигиенические исследования физических факторов рабочей зоны с целью аттестации рабочих мест — аккредитованной заводской лабораторией.

— Изготовление деталей из цветных и черных металлов любой сложности, в том числе и оснастки (штампы, пресс-формы, приспособления) на обрабатывающем центре МАНО 600С и токарных и фрезерных станках с ЧПУ. Наличие токарных автоматов и механических и гидравлических прессов обеспечивают возможность серийного выпуска продукции.

Качество работ гарантируется сертификатом ISO 9001:2000

Украина, 79000, г. Львов, ул. Шевченко, 311
Тел.: +38-0322-91-39-84, 91-37-52, 91-37-54
Факс: +38-0322-91-15-75
E-mail: ztt1@lviv.gu.net

ISO
9001:2000

7-я специализированная выставка

ИЗДЕЛИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ. ДИВЕРСИФИКАЦИЯ ОПК

17–20 октября 2006 года

Москва ВВЦ павильон № 20



- Высокие технологии оборонного комплекса и гражданского сектора экономики
- Изделия и технологии оборонного комплекса, предназначенные для использования в гражданском секторе экономики
- Конверсионная продукция
- Коммерциализация технологий
- Инвестиционные проекты

ДЕЛОВАЯ ПРОГРАММА

Конференции по актуальным вопросам использования технологий двойного назначения

Семинары и круглые столы для специалистов

Конкурс на лучшие импортозамещающие изделия

Презентации участников выставки

Дирекция выставки:

Тел: (095)181-6083; тел./факс: (095)258-8762

e-mail: zmv@emercom-expo.ru; newexpo@nm.ru; http://www.expo-design.ru





Украина, Киев
октябрь 2006



**Мир
на кончиках пальцев**

**9-я международная специализированная выставка
электронных компонентов и комплектующих
«Мир электроники 2006»**

www.presto.kiev.ua

Выставочный центр "АССО International"
пр-т Победы, 40-б, парк им. А.С. Пушкина

Оргкомитет выставки – ООО «PrestoExpo»
03062, Украина, г. Киев, ул. Чистяковская, 2, оф. 11
тел/факс: +38 (044) 449-94-76, 443-73-50
e-mail: info@presto.kiev.ua www.presto.kiev.ua

Номер готовили

*Винница, Дрогобыч, Киев, Львов, Москва,
Минск, Одесса, Рыбинск, Санкт-Петербург,
Ташкент, Томск, Харьков, Черновцы.*



Пишите

Подписывайтесь

Читайте

2(62) 2006