

Технология и конструирование в электронной аппаратуре

К статье «Формирование полированной
поверхности халькогенидов Bi и Sb
в травильных композициях $K_2Cr_2O_7-HBr$ »



6 2011

НОЯБРЬ — ДЕКАБРЬ

ТЕХНИКА
СРЕДСТВ СВЯЗИ

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА
И ОБОРУДОВАНИЕ (ТПО)



В 1976 году в Научно-исследовательском технологическом институте «Темп» по инициативе его директора В. С. Доброера была создана одесская редакция отраслевого сборника «Техника средств связи. Серия ТПО». В следующем, 1977 году вышел в свет первый одесский выпуск «ТСС-ТПО», со временем давший начало сегодняшнему журналу «Технология и конструирование в электронной аппаратуре».

Заканчивается 2011-й год, 35-й год издания «ТКЭА». В этом году началась подготовка к переходу журнала на новый уровень, подготовка к его включению в такие международные базы данных, как Web of Science и Scopus. Журнал ждет от своих авторов новых результатов, достойных широкого интереса и внимания!

2011 год — это и год 80-летия первого главного редактора журнала Владимира Сергеевича Доброера. Журнал желает своему основателю доброго здоровья и хорошего настроения!

Впереди год новый — с новыми планами, новыми надеждами. Пусть же наступающий 2012-й будет для всех нас годом новых успехов, новых радостей!

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

ISSN 2225-5818

Выходит один раз в 2 месяца

Регистрационный номер КВ 13418-2302ПР

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

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



Номер выпущен при поддержке
НИИ «Орион», (г. Киев),
НПП «Карат» (г. Львов),
ЦКБ «Ритм» (г. Черновцы)

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

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

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

E-mail: tkea@optima.com.ua, web-сайт: www.tkea.com.ua,

тел. +38 (048)728-18-50,

тел./факс 728-49-46.

Редакция: Е. А. Тихонова, А. А. Ефименко,
А. А. Алексеева, М. Г. Глава, Н. М. Колганова.

Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корецкая.

Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.

Подписано к печати 29.12 2011. Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.

Печ. л. 9,0+1,0. Уч.-изд. л. 9,5. Тираж 250 экз. Заказ № 31.

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

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

**ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2011

№ 6

Год издания 35-й

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К.т.н. В. М. Чмиль

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Д.т.н. Н. М. Вакив (г. Львов)
Д.т.н. В. Н. Годованюк (г. Черновцы)
К.т.н. А. А. Даиковский (г. Киев)
Н. В. Кончиц (г. Киев)
Д.ф.-м.н. В. Ф. Мачулин (г. Киев)
Д.т.н. Г. А. Оборский (г. Одесса)
Е. А. Тихонова (г. Одесса)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д.т.н. С. Г. Антощук (г. Одесса)
Д.т.н. А. А. Ащеулов (г. Черновцы)
Д.т.н. В. В. Баранов (г. Минск)
К.т.н. Э. Н. Глушеченко,
зам. гл. редактора (г. Киев)
Д.т.н. В. В. Данилов (г. Донецк)
К.т.н. И. Н. Еримичой,
зам. гл. редактора (г. Одесса)
К.т.н. А. А. Ефименко,
ответственный секретарь (г. Одесса)
Д.ф.-м.н. Д. В. Корбутяк (г. Киев)
Д.т.н. С. Ю. Лузин (г. С.-Петербург)
Д.т.н. В. П. Малахов (г. Одесса)
К.т.н. И. Л. Михеева (г. Киев)
Д.т.н. И. Ш. Невлюдов (г. Харьков)
Д.т.н. Ю. Е. Николаенко (г. Киев)
К.ф.-м.н. А. В. Рыбка (г. Харьков)
К.т.н. В. В. Рюхтин (г. Черновцы)
Д.ф.-м.н. М. И. Самойлович (г. Москва)
Д.т.н. В. С. Ситников (г. Одесса)
Д.т.н. Я. Стеванович (г. Белград)
Д.т.н. З. Стевич (г. Белград)
Д.х.н. В. Н. Томашик (г. Киев)
Д.т.н. В. М. Шокало (г. Харьков)
Д.ф.-м.н. О. И. Шпотюк (г. Львов)

УЧРЕДИТЕЛИ

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

Одобрено к печати Ученым советом ОНПУ
(Протокол № 4 от 27.12.2011 г.)

Электронные средства: исследования, разработки

Сшивка полигонов на двухслойной печатной плате. *Муров С. Ю.* 3

Системы передачи и обработки сигналов

Фоторефрактивные кристаллы в запоминающих устройствах опто-
электронных процессоров корреляционного типа. *Липинский А. Ю.,
Рудякова А. Н., Данилов В. В.* 5

Сенсоэлектроника

Математическая модель процесса избыточных измерений при не-
прерывном воздействии измеряемой физической величины на чув-
ствительный элемент датчика. *Редько В. В.* 10

Функциональная микро- и нанoeлектроника

Модель алмазного транзистора. *Алтухов А. А., Зяблюк К. Н., Митя-
гин А. Ю., Талипов Н. Х., Чучева Г. В.* 13
Гибридная интегральная схема для обработки звукового сигнала.
Ковальчук В. А., Севастьянов В. В. 20

Технологические процессы и оборудование

Повышение помехоустойчивости бинаризации изображений фо-
тошаблонов в пространстве вейвлет-преобразования. *Щербакова
Г. Ю., Дилевский А. А., Крылов В. Н., Логвинов О. В., Плачинда О. Е.* 23
Формирование полированной поверхности халькогенидов Bi и Sb в
травильных композициях $K_2Cr_2O_7$ -HBr. *Павлович И. И., Томашик
З. Ф., Томашик В. Н., Стратийчук И. Б.* 27
Метод определения температуры и теплового сопротивления то-
чек поверхности кристалла интегральной схемы. *Попов В. М., Кли-
менко А. С., Поканевич А. П., Самотовка В. Л.* 30

Материалы электроники

Особенности конденсации фуллеренов из молекулярного пучка в
вакууме. *Нелюба П. Л.* 35
Исследование процесса термической деполяризации сегнетокера-
мики $(Pb,Sr)(Zr,Ti)O_3$. *Кузенко Д. В., Бажин А. И., Ступак В. А., Ки-
сель Н. Г., Дорофеева В. В., Старшинов И. Н., Покинтелица А. Е.* 40
Исследование допустимой импульсной мощности кремниевой
 p^+-p-p^+ -структуры. *Каримов А. В., Ёдгоров Д. М., Абдулхаев
О. А., Каримов А. А., Асанова Г. О.* 43

Метрология. Стандартизация

Измерительный преобразователь, индифферентный к хаотиче-
скому возбуждению чувствительного элемента. *Короткий В. П.,
Ильин В. Н.* 46

СВЧ-техника

Фокусировка интенсивных электронных потоков в спиральной ЛБВ
с МПФС с несинусоидальным полем. *Часнык В. И.* 49
Перспективная телекоммуникационная аппаратура 53

Аннотации к статьям номера:

на русском языке 55
на украинском 58
на английском 61

Список рецензентов

Новые книги

12, 26, 34, 39, 42

ЗМІСТ

Електронні засоби: дослідження, розробки

Зшивання полігонів на двошаровій друкованій платі. *Муров С. Ю.* (3)

Системи передачі та обробки сигналів

Фоторефрактивні кристали в запам'ятовуючих пристроях оптоелектронних процесорів кореляційного типу. *Ліпінський О. Ю., Рудякова Г. М., Данилов В. В.* (5)

Сенсоелектроніка

Математична модель процесу надлишкових вимірювань при неперервному впливі вимірюваної фізичної величини на чутливий елемент сенсора. *Редько В. В.* (10)

Функціональна мікро- та наноелектроніка

Модель алмазного транзистора. *Алтухов А. О., Зяблюк К. Н., Митягін О. Ю., Таліпов Н. Х., Чучева Г. В.* (13)

Гібридна інтегральна схема для обробки звукового сигналу. *Ковальчук В. О., Севаст'янов В. В.* (20)

Технологічні процеси та обладнання

Підвищення завадостійкості бінаризації зображень фотомасок в просторі вейвлет-перетворення. *Щербатова Г. Ю., Ділевський А. А., Крилов В. М., Логвинов О. В., Плачинда О. Є.* (23)

Формування полірованої поверхні халькогенідів Ві та Сб в травильних композиціях $K_2Cr_2O_7-HBr$. *Павлович І. І., Томашик З. Ф., Томашик В. М., Стратійчук І. Б.* (27)

Метод визначення температури та теплового опору точок поверхні кристала інтегральної схеми. *Попов В. М., Клименко А. С., Pokanevich О. П., Самотовка В. Л.* (30)

Матеріали електроніки

Особливості конденсації фулеренів з молекулярного пучка у вакуумі. *Нелюба П. Л.* (35)

Дослідження процесу термічної деполяризації сегнетокераміки $(Pb, Sr)(Zr, Ti)O_3$. *Кузенко Д. В., Бажин А. І., Ступак В. А., Кисіль М. Г., Дорофєєва В. В., Старишинов І. М., Pokintelitsa А. Е.* (40)

Дослідження допустимої імпульсної потужності кремнієвої p^+-p-n^+ -структури. *Карімов А. В., Йодгорова Д. М., Абдулхаєв О. А., Карімов А. А., Асанова Г. О.* (43)

Метрологія. Стандартизація

Вимірювальний перетворювач, індиферентний до хаотичного збудження чутливого елемента. *Короткий В. П., Льїн В. М.* (46)

НВЧ-техніка

Фокусування інтенсивних електронних потоків у спіральній ЛБВ із МПФС із несинусоїдальним полем. *Часник В. І.* (49)

Перспективна телекомунікаційна апаратура (53)

CONTENTS

Electronic facilities: investigations, development

Merging polygons on two-layer printed circuit board. *Murov S. Yu.* (3)

Systems of signals transfer and processing

Optoelectronic correlation processors with photorefractive crystals for the storage elements *Lipinskii A. Y., Rudiakova A. N., Danilov V. V.* (5)

Sensoelectronic

Mathematical model of process of redundant measurements with uninterrupted influence of measurand on sensing element of sensor. *Red'ko V. V.* (10)

Functional micro- and nanoelectronics

The diamond RF-transistor model *Altukhov A. A., Zyabluk K. N., Mityagin A. Yu., Talipov N. H., Chucheva G. V.* (13)

Hybrid integrated circuits for sound signal processing. *Koval'chuk V. A., Sevast'yanov V. V.* (20)

Technological processes and equipment

Increase of noise immunity of photomask images binarization in the space of the wavelet transform. *Shcherbakova G. Yu., Dilevsky A. A., Krylov V. N., Logvinov O. V., Plachinda O. E.* (23)

Formation of polished surface of Bi and Sb chalcogenides in pickling compositions $K_2Cr_2O_7-HBr$. *Pavlovich I. I., Tomashik Z. F., Tomashik V. N., Stratiichuk I. B.* (27)

Method of determination of temperature and heat resistance of the points on the integrated circuit crystal surface. *Popov V. M., Klimenko A. S., Pokanevich A. P., Samotovka V. L.* (30)

Materials of electronics

Peculiarities of fullerenes condensation from molecular beam in vacuum. *Neluba P. L.* (35)

Research of the process of thermal depolarization of ferroelectric ceramics $(Pb, Sr)(Zr, Ti)O_3$. *Kuzenko D. V., Bazhin A. I., Stupak V. A., Kisel M. G., Dorofeeva V. V., Starshinov I. M., Pokintelitsa A. E.* (40)

Research of the tolerable pulsed power of silicon p^+-p-n^+ -structure. *Karimov A. V., Yodgorova D. M., Abdulhaev O. A., Karimov A. A., Asanova G. O.* (43)

Metrology. Standartization

The measuring converter indifferent to chaotic excitation of a sensitive element. *Korotkii V. P., Il'in V. N.* (46)

Microwave technology

Focusing of intensive electron beams in helix TWT with PPM focusing system with nonsinusoidal field. *Chasnyk V. I.* (49)

Promising telecommunicational equipment (53)

С. Ю. МУРОВ

УДК 681.3

Россия, Санкт-Петербургский государственный университет
 телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
 E-mail: ncdf@mail.ru

Дата поступления в редакцию
 17.08 2011 г.

СШИВКА ПОЛИГОНОВ НА ДВУХСЛОЙНОЙ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ

Предложен метод решения задачи подключения максимального числа изолированных островков металлизированных областей одной цепи, расположенных на разных слоях печатной платы.

Для целей экранирования печатных плат достаточно часто используется металлизация в их сигнальных слоях. Наличие сигнальных проводников и контактов в области металлизации часто приводит к появлению изолированных участков заливки (островков), которые не связаны с цепью, подключенной к области металлизации. Обычно такие островки удаляют или, если области металлизации, подключенные к какой-либо цепи, расположены в нескольких слоях, островки, изолированные на одном слое, с помощью межслойных переходов присоединяют к области металлизации другого слоя. Выполнение подобной операции вручную довольно трудоемко. В настоящей работе предлагается метод решения этой задачи в процессе автоматической трассировки плат.

Рассмотрим следующую задачу. Пусть на полностью разведенной двухслойной плате с обеих сторон положены полигоны земли (или питания). Требуется с помощью расстановки межслойных переходов обеспечить подключение максимального числа неподключенных островков.

Для ее решения предлагается алгоритм, приведенный на **рис. 1**. Рассмотрим пример реализации приведенного алгоритма.

На **рис. 2** приведен фрагмент двухслойной печатной платы, который содержит семь островков металлизации (**ОМ**) — четыре на верхнем слое и три на нижнем. Подключенным к соответствующей цепи является только островок №1 (на нем имеется пара контактов).

Согласно алгоритму, на первой итерации во фронт помещается **ОМ** №1 и проверяется наличие пересечений его проекции с неподключенными островками на нижнем слое. Проекция **ОМ** №1 на нижний слой пересекается только с **ОМ** №5 (см. **рис. 3, а**, где область пересечения заштрихована). В области пересечения размещается межслойный переход. Островок №5 помещается в “Новый фронт”. **ОМ** “Нового фронта” (№5) исключаются из списка неподключенных и становятся островками текущего фронта.

Поместить во фронт все подключенные островки.
 Пока фронт не пуст

```
{
  Новый фронт пуст.
  Для каждого островка фронта
  {
    Для каждого неподключенного островка на
    другом слое
    {
      Если проекция островка фронта пересекается
      с неподключенным островком на другом слое, то
      Если в области пересечения помещается
      межслойный переход
      {
        Установить переход.
        Поместить островок в Новый фронт.
      }
    }
  }
  Исключить островки Нового фронта из неподключенных.
  Фронт = Новый фронт
}
```

Рис. 1. Алгоритм решения задачи

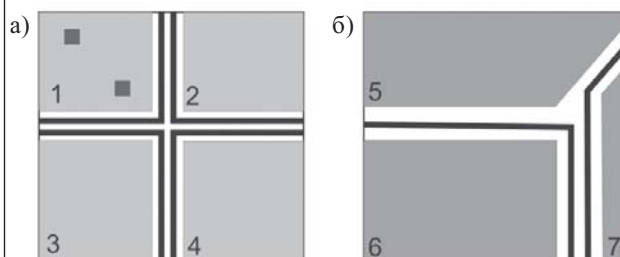


Рис. 2. Фрагмент двухслойной печатной платы:
 а — верхний слой; б — нижний слой

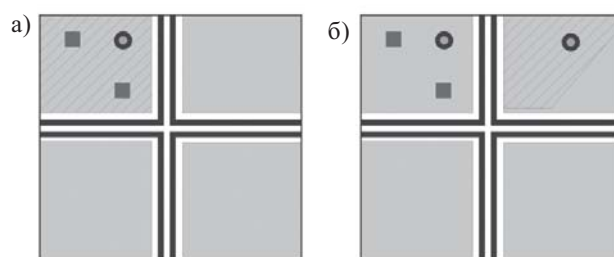


Рис. 3. Подключение островков №5 (а) и №2 (б)

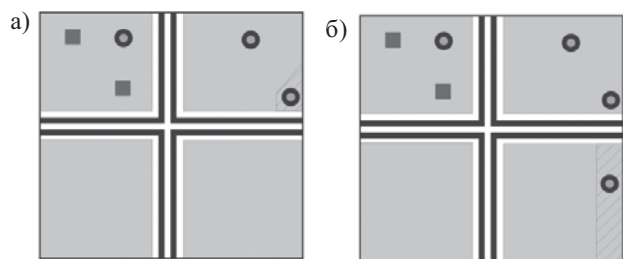


Рис. 4. Подключение островков №7 (а) и №3 (б)

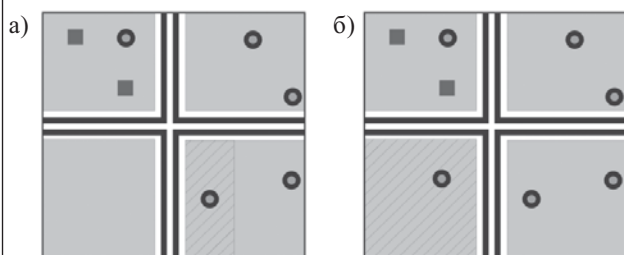


Рис. 5. Подключение островков №6 (а) и №4 (б)

На следующей итерации проверяется наличие пересечений проекции ОМ №5 с неподключенными островками на верхнем слое. Пересечение есть только с ОМ №2 (на рис. 2, б область пересечения заштрихована).

Далее проводится последовательное соединение следующих островком (рис. 4, 5): №2—№7—№3—№6—№4. Таким образом будут подключены все семь островков.

В приведенном алгоритме за условием «Если в области пересечения помещается межслойный переход» скрывается отдельная задача: найти радиус вписанной в область пересечения окружности и сравнить его с радиусом межслойного перехода.

Если область пересечения — правильный многоугольник, задача тривиальна (центр вписанной окружности — точка пересечения биссектрис углов многоугольника). Однако это может быть неправильный многоугольник (и даже не один), и тогда стоит нетривиальная задача нахождения максимального радиуса вписанной в такой многоугольник окружности. Можно построить триангуляцию области пересечения, но радиусы вписанных в треугольники окружностей будут малы (существенно меньше максимального радиуса вписанной в многоугольник окружности), а описанные окружности могут выходить за границы области, поскольку стороны треугольников могут находиться на границе области (рис. 6).

В [1, с. 157] предложена структура разбиения плоскости, названная квазитриангуляцией. Она обладает свойствами триангуляции Делоне, но ее вершинами служат не точки, а произвольно наклоненные отрезки (рис. 7).

В отличие от триангуляции, в квазитриангуляции стороны всех треугольных граней лежат внутри триангулированной области. На границе области могут находиться только вершины треугольников. То есть при использовании квазитриангуляции можно рассчитывать на нахождение большего радиуса вписанной окружности, чем при использовании триангуляции.

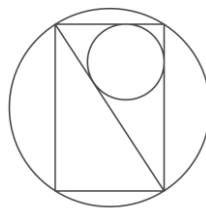


Рис. 6. Триангуляция прямоугольной области с вписанной в треугольную грань и описанной вокруг нее окружностями

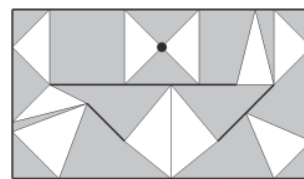


Рис. 7. Квазитриангуляция (черным цветом показаны отрезки топологии — квазивершины, серым — квазиребра, белым — грани)

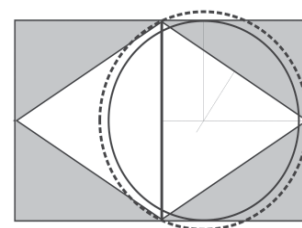


Рис. 8. Квазитриангуляция прямоугольной области

Определить, помещается ли в области пересечения межслойный переход, можно следующим образом:

1. Для области пересечения островков построить квазитриангуляцию.
2. Для каждой треугольной грани найти центр описанной окружности. (Точка пересечения серединных перпендикуляров к сторонам треугольника.)
3. Если для какой-либо грани радиус описанной окружности не меньше радиуса межслойного перехода, из найденного центра восстановить перпендикуляры к сторонам границы области, на которых расположены вершины грани.
4. Если длина меньшего из этих перпендикуляров не меньше радиуса межслойного перехода, это означает, что межслойный переход может быть установлен без нарушения конструктивно-технологических нарушений.

Приведем пример. На рис. 8 представлена квазитриангуляция области, показанной на рис. 6. Вершинами квазитриангуляции являются стороны прямоугольной области. Описанная вокруг грани окружность выходит за границы области, но концентрическая окружность со скорректированным радиусом уже целиком находится внутри области, и если ее радиус не меньше радиуса межслойного перехода, то последний вписывается в область без нарушений конструктивно-технологических ограничений.

Таким образом, предложенный метод решения задачи подключения максимального числа изолированных островков металлизированных областей одной цепи, расположенных на разных слоях печатной платы, может быть использован в процессе автоматической трассировки плат.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Лузин С. Ю., Лячек Ю. Т., Петросян Г. С., Полубасов О. Б. Модели и алгоритмы автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры. — СПб: БХВ-Петербург, 2010. [Luzin S. Yu., Lyachek Yu. T., Petrosyan G. S., Polubasov O. B. Modeli i algoritmy avtomatizirovannogo proektirovaniya radioelektronnoi apparatury. S-Pb. BKhV-Peterburg, 2010.]

К. т. н. А. Ю. ЛИПИНСКИЙ, к. т. н. А. Н. РУДЯКОВА,
д. т. н. В. В. ДАНИЛОВ

УДК 004.31:004.22:534:621.382

Украина, Донецкий национальный университет
E-mail: krf@dongu.donetsk.ua

Дата поступления в редакцию
01.08 2011 г.

ФОТОРЕФРАКТИВНЫЕ КРИСТАЛЛЫ В ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРОЦЕССОРОВ КОРРЕЛЯЦИОННОГО ТИПА

Рассмотрены голографические корреляторы совместного преобразования, обеспечивающие инвариантность к сдвиговым искажениям, динамический голографический коррелятор, акустооптические корреляционные процессоры с памятью.

Оптические корреляторы являются эффективными устройствами для распознавания образов благодаря быстройдействию, обусловленному параллельностью обработки больших массивов информации. Они могут быть использованы в системах машинного зрения, устройствах слежения за объектами, системах доступа и безопасности [1].

Для решения большинства задач корреляционного анализа применяются два способа выполнения операции свертки в оптических вычислительных устройствах. Возможно выполнение свертки как в области пространственных частот (Фурье-свертка), так и во временной области (так называемая временная свертка) [2]. Однако независимо от выбранного способа информация об одном из сравниваемых сигналов должна сохраняться в запоминающем устройстве [3], в качестве которого целесообразно выбрать голографическую среду с малыми постоянными времени формирования и распада голограммы. В качестве таких сред наиболее часто используются фоторефрактивные кристаллы [4–6]. В [7, 8] рассмотрены возможности применения кристаллов LiNbO_3 для решения задач записи, хранения, преобразования информации.

В настоящей работе представлен обзор оптических и акустооптических процессоров корреляционного типа, использующих фоторефрактивные кристаллы. Рассмотрены голографические корреляторы совместного преобразования, обеспечивающие инвариантность к сдвиговым искажениям, динамический голографический коррелятор, акустооптические корреляционные процессоры с памятью.

Инвариантный к сдвигу фоторефрактивный коррелятор совместного преобразования на кристаллических пластинах Fe:LiNbO_3

Коррелятор совместного преобразования является одним из наиболее широко изученных устройств, выполняющих корреляцию оптических изображений [9, 10]. Для работы в режиме реального времени это

устройство удобнее всего использовать в комбинации с фоторефрактивными кристаллами. В литературе представлено множество таких оптических корреляторов изображений, использующих как пространственные модуляторы света, так и фоторефрактивные кристаллы в Фурье-области [11, 12]. Хотя технологии пространственных модуляторов света существенно продвинулись вперед, разрешение таких устройств до сих пор остается недостаточным по сравнению с фоторефрактивными кристаллами, способными работать в режиме реального времени. При этом некоторые фоторефрактивные материалы, такие как силенины и сложные полупроводники, обладают значительной чувствительностью к интенсивности падающего света. С другой стороны, из-за Брэгговской природы дифракции в случае объемной голограммы оптические корреляторы на основе фоторефрактивных кристаллов имеют узкое поле зрения, что является причиной низкой инвариантности к сдвигу.

Экспериментальная установка инвариантного к сдвигу фоторефрактивного коррелятора совместного преобразования [1] приведена на рис. 1. Луч лазера (с длиной волны $\lambda=514,5$ нм) необыкновенной поляризации после коллиматора разделяется на два. Лучи расширяются (до приблизительно 9 мм в диаметре) и каждый пространственно модулируется транспарантом с изображением. Изображение объекта содержит две строки символов — UCSB и OPTICS. Опорное изображение — это буква С. Высота букв составляет 1,5 мм. Эти два транспаранта расположены в фокальных плоскостях линз, выполняющих преобразование Фурье, с фокусным расстоянием 150 мм. Угол между объектным и опорным лучами составляет около 17° . Сильнолегированный тонкий фоторефрактивный кристалл Fe:LiNbO_3 расположен в задней фокальной плоскости линз, выполняющих преобразование. Образец кристалла толщиной 48 мкм, полированный с двух сторон, присоединяется к стеклянной подложке оптическим клеем.

Через фоторефрактивную решетку кристалла проходит коллимированный пучок лучей, распространяющийся навстречу опорному лучу. Корреляционный сигнал через светоделитель регистрируется фотокамерой или фотодетектором, которые могут быть установлены вместо экрана. Автокорреляция изображения буквы С дает сигнал более сильный, чем сигнал



Рис. 1. Оптическая схема экспериментальной установки инвариантного к сдвигу фоторефрактивного коррелятора совместного преобразования на кристаллических пластинах Fe:LiNbO_3 [1]

взаимной корреляции букв О и S, который дает вторичные пики.

В [1] проводилось тестирование свойств инвариантности к сдвигу коррелятора. Опорное изображение перемещали по горизонтали. Корреляция наблюдалась по всей апертуре кристалла шириной 9 мм. Далее тонкий образец (48 мкм) кристалла Fe:LiNbO_3 заменяли толстым (1 мм) кристаллом Rd:SBN . При этом размер области, где проявляется инвариантность к сдвигу, снизился примерно с 7 до 0,4 мм. Таким образом, было установлено, что при использовании тонкого кристалла свойства сдвиговой инвариантности коррелятора совместного преобразования примерно в 20 раз лучше, чем при использовании толстого фоторефрактивного кристалла. Дифракционная эффективность 48-мкм кристалла составила около 3% по сравнению с 34% для 1-мм SBN-кристалла. Значительное повышение сдвиговой инвариантности для тонкого кристалла сопровождалось понижением эффективности дифракции, которое может быть частично компенсировано использованием высокочувствительных детектирующих устройств, таких как ПЗС-фотокамера. Также эффективность дифракции может быть повышена выбором соответствующего кристалла и степенью его легирования. Время отклика для кристалла LiNbO_3 в общем случае является небольшим. Однако из-за повышения квантовой эффективности, которое является результатом сильного легирования, было получено время отклика 400 мс при интенсивности записывающего луча 2 Вт/см^2 .

Динамический голографический коррелятор совместного преобразования Фурье на основе кристалла $\text{CdF}_2:\text{Ga}$

На рис. 2 приведена оптическая схема предложенного в [13] коррелятора на основе кристалла $\text{CdF}_2:\text{Ga}$. В соответствии со схемой, в корреляторе сформиро-

ваны оптические каналы записи и считывания. Канал записи состоит из расширителя светового пучка, транспарантов с изображениями эталонного $r(x, y)$ и $s(x, y)$ анализируемого объектов. Собирающая линза (фокусное расстояние $f_1 = 600 \text{ мм}$) выполняет преобразование Фурье изображения транспаранта. Отрицательная линза (фокусное расстояние 150 мм) уменьшает угол сведения пучков от объектов $r(x, y)$ и $s(x, y)$, в результате чего интерференционная картина, сформированная в частотной плоскости коррелятора, записывается в виде голограммы, которая представляет собой фильтр пространственных частот для сигнала изображения в кристалле $\text{CdF}_2:\text{Ga}$. Плоский волновой фронт, сформированный в канале считывания, поступает на фоторефрактивный кристалл в направлении, противоположном направлению записывающих пучков, и восстанавливает записанную голограмму. Далее оптический клин направляет дифрагированный пучок на линзу с фокусным расстоянием 200 мм, где производится второе преобразование Фурье, а результат корреляции регистрируется при помощи CCD-камеры с форматом 768×576 пикселей и 256 градациями серого.

Режимы записи-считывания разделены во времени при помощи управляемых механических затворов таким образом, что частотная плоскость коррелятора освещается пучками записи-считывания в зависимости от времени распада голограмм, что позволяет проводить процедуру корреляции при переключении канала с частотой 0,1—1 Гц.

Коррелятор работает с двоичными и полутоновыми амплитудными транспарантами ($24 \times 36 \text{ мм}$, разрешение 25 пиксел/мм) в виде непрозрачного поля с пропускающими изображениями сравниваемых объектов.

Отличие оптической схемы рассматриваемого устройства от стандартной схемы коррелятора состо-

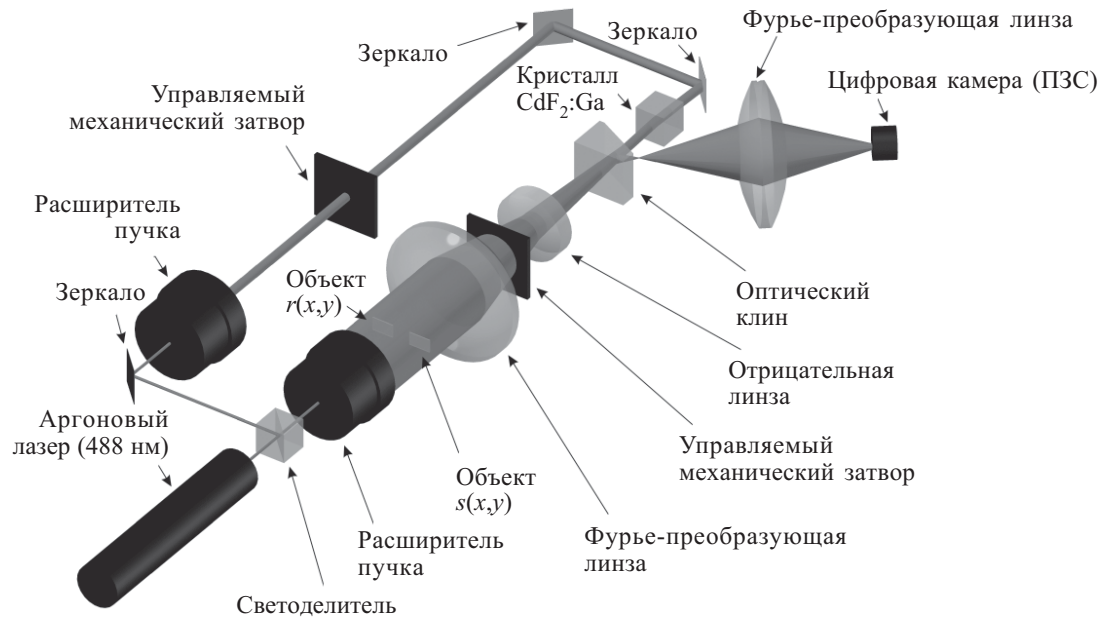


Рис. 2. Оптическая схема коррелятора совместного преобразования Фурье на основе кристалла $\text{CdF}_2:\text{Ga}$ [13]

ит в наличии дополнительной отрицательной линзы, установленной на расстоянии L_1 от Фурье-линзы и на расстоянии L_2 от кристалла ($L_1=500$ мм, $L_2=220$ мм). Это приводит к увеличению в M раз эффективного фокусного расстояния Фурье-преобразования при записи голограммы:

$$M=L_2/(f_{10}-L_1)\approx 2,2$$

и смещению плоскости формирования Фурье-образов в режиме записи в объеме кристалла. Таким образом удастся скомпенсировать эффект изменения показателя преломления в области светового канала, делающий невозможным последующее восстановление голограммы пучком считывания [14]. Подобное видоизменение оптической схемы приводит к появлению фазового множителя сферической волны в выражении для комплексной амплитуды транспаранта в плоскости, находящейся от линзы на расстоянии, не равном ее фокусному расстоянию. Это, однако, не влияет на процесс записи голограммы в кристалле, так как, во-первых, голографическая среда регистрирует квадрат амплитуды поля (интенсивность света), а во-вторых, масштабному преобразованию подвергаются оба объекта (транспаранта), т. е. не происходит их рассогласования по размерам.

Акустооптический коррелятор с памятью на кристалле LiNbO_3

Акустооптические процессоры корреляционного типа, работающие во временной области, реализуют операцию вычисления свертки и корреляционной функции и могут содержать устройства памяти для хранения информации об эталонном сигнале.

В корреляторе с памятью [15] радиочастотный сигнал от генератора (рис. 3) подается на электроакустический преобразователь, генерирующий поверхностную акустическую волну, которая распространяется в приповерхностном слое кристалла ниобата лития. Область акустооптического взаимодействия освещают

короткоимпульсным лазерным излучением ($\lambda=532$ нм), падающим под углом Брэгга. При этом происходит «запоминание» распространяющейся волны s_1 в освещаемой области в виде пространственно изменяющегося показателя преломления. Лазерный импульс должен быть коротким по сравнению с периодом радиочастотного сигнала (ширина импульса составляет около 10% периода радиочастотного сигнала).

В основе работы рассматриваемого устройства лежит фоторефрактивный эффект, который в электрооптических кристаллах определяется диффузионным, фотовольтаическим и тепловым механизмами [16—18].

Распределение электрического поля пространственного заряда в освещенной области кристалла LiNbO_3 получено в [18] в результате решения связанной системы упрощенных уравнений Кухтарева, учитывающих вклад диффузионного и фотовольтаического эффектов [19]:

$$E(x, y, z) \approx \frac{D_s}{\mu N_D [sI(x, y, z) + \beta]} \times \\ \times \left[SN_D \nabla I(x, y, z) + \frac{k\alpha r_R N_A}{e D_s} I(x, y, z) \right],$$

где D_s — диффузионная постоянная, $D_s=(k_B T/e)\mu$;

k_B — постоянная Больцмана;

T — температура;

e — заряд электрона;

μ — подвижность носителей;

N_D, N_A — концентрация доноров и акцепторов;

S — эффективное сечение ионизации на квант света;

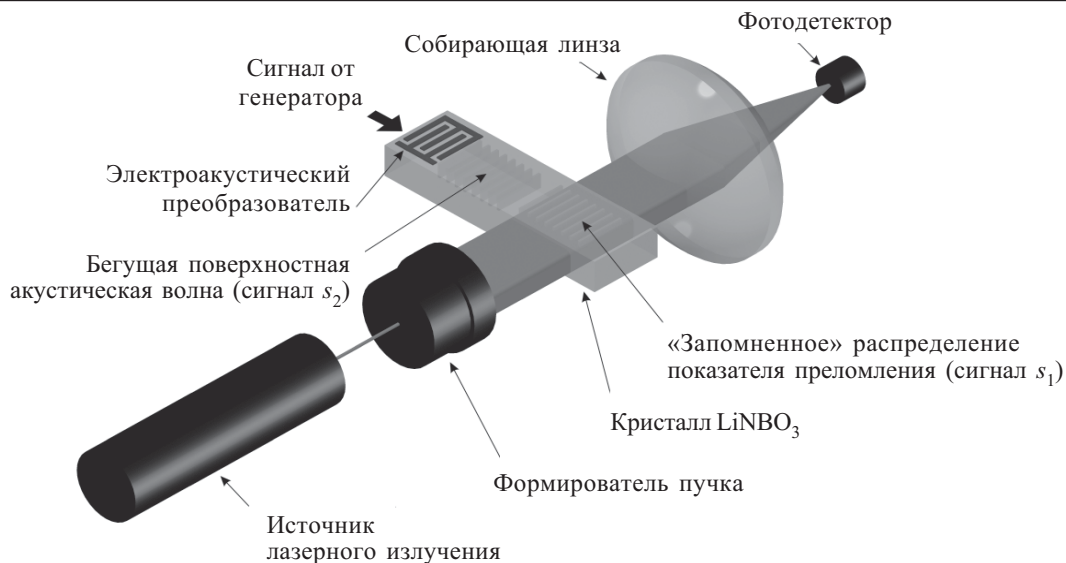
$I(x, y, z)$ — распределение интенсивности в плоскости поперечных координат x и y для фиксированного значения z в фоторефрактивном материале;

β — скорость тепловой генерации;

k — фотовольтаическая постоянная (вектор);

α — коэффициент поглощения;

r_R — скорость рекомбинации носителей.

Рис. 3. Схема устройства акустооптического коррелятора с памятью на кристалле LiNbO_3 [15]

В этом соотношении первый член учитывает вклад диффузионного эффекта, а второй — фотовольтаического [19]. Вклад теплового эффекта в рассматриваемом случае не оказывает существенного влияния на принцип действия устройства.

Общий индуцированный показатель преломления $\Delta n(x, y, z)$ может быть записан как

$$\Delta n(x, y, z) = -0,5 n_e^3 \gamma_{33} E,$$

где n_e — показатель преломления необыкновенной волны; γ_{33} — соответствующий электрооптический коэффициент.

То есть интенсивность светового потока на выходе акустооптического модулятора пропорциональна произведению $s_1(t) \cdot s_2(t+T)$, где t — переменная, соответствующая изменению амплитуды сигналов в направлении распространения; T — время, необходимое для вычисления корреляции.

Световой поток с выхода модулятора фокусируется сферической линзой на фотодетекторе ($p-i-n$ -

диоде), выходной ток которого i_d будет пропорционален корреляционной функции сигналов s_1 и s_2 :

$$i_d \sim \int s_1(t) \cdot s_2(t+T) dt.$$

Рассматриваемый акустооптический коррелятор с памятью имеет ограничение по плотности записанной информации, связанное с физическим разрешением 4000 линий/мм и трудностями, возникающими при получении световых импульсов малой длительности. Вычисление корреляционного интеграла таким устройством осуществляется за время, меньшее чем 10 мкс [15].

Акустооптический коррелятор с памятью и дискретным представлением информации

В основу коррелятора с акустооптической памятью [20] положено устройство [15] на основе фоторефрактивного эффекта, возникающего при падении мощного пространственно-модулированного светового пучка на кристалл ниобата лития. При переходе к дискретному представлению информации в канале

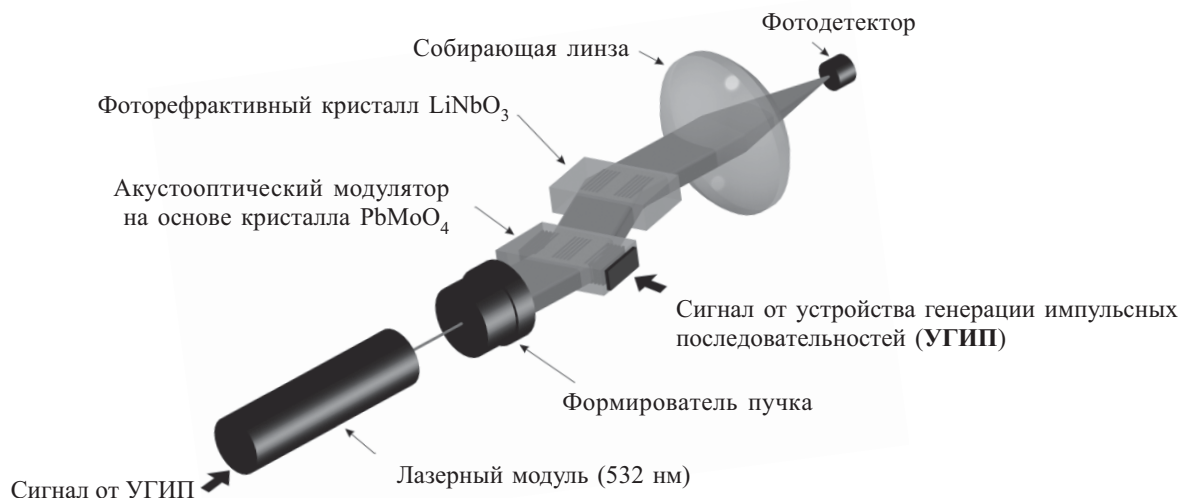


Рис. 4. Схема устройства акустооптического коррелятора с памятью и дискретным представлением информации [20]

преобразования амплитуда сигналов может в десятки раз превосходить уровни шумов, что позволит увеличить точность преобразования и создать устройство с числом разрядов 64 и более [21].

Электрический сигнал с драйвера акустооптического модулятора (АОМ) подается на электроакустический преобразователь, который возбуждает звуковую волну, распространяющуюся вдоль кристалла PbMoO_4 (рис. 4). Этот же кристалл под углом Брэгга освещается лазерным короткоимпульсным излучением с длиной волны 532 нм. Пространственно-модулированный пучок с выхода первого дифракционного порядка АОМ направляется в фоторефрактивный кристалл ниобата лития, в котором фиксируется изображение пространственно изменяющегося показателя преломления. Таким образом осуществляется запоминание модулированного радиочастотного сигнала во втором кристалле.

Корреляционная функция для сигнала, запомненного в кристалле ниобата лития и который подается в кристалл PbMoO_4 , формируется на выходе фотоприемного устройства при освещении акустооптического модулятора световыми импульсами малой мощности.

Управляющие импульсные последовательности для драйверов АОМ и лазерного модуля формируются на выходе быстродействующего программируемого сдвигового регистра переменной разрядности на FPGA Altera Cyclone, тактируемого цифровым синтезатором частот AD9959 [22].

Анализ принципов построения и функционирования устройств, использующих корреляционный алгоритм распознавания образов методом согласованной фильтрации Фурье-спектра, показал, что реализация динамического режима записи-считывания позволит существенно повысить эффективность оптической обработки входного изображения объекта при его идентификации и сравнении с несколькими эталонными.

Применение фоторефрактивных материалов в качестве динамически перезаписываемого амплитудно-фазового транспаранта с информацией, записанной с помощью увеличения интенсивности оптического луча, делает возможным «оптическое» управление устройством.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- He Q. B., Yeh P., Hu L. J. et al. Shift-invariant photorefractive joint-transform correlator using Fe:LiNbO_3 crystal plates // *Applied Optics*.— 1993.— Vol. 32, N. 17.— P. 3113—3115.
- Оптические вычисления: Сбор. статей // Под ред. Р. Аппатуна.— М.: Мир, 1993. [Opticheskie vychisleniya: Sbor. statei // Pod red. R. Appatuna. Moscow. Mir, 1993]
- Васильев В. Н., Павлов А. В. Оптические технологии искусственного интеллекта / Учебное пособие. Т. 1.— СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. [Vasil'ev V. N., Pavlov A. V. Opticheskie tekhnologii iskusstvennogo intellekta / Uchebnoe posobie. Vol. 1. SPb: SPbGU ITMO. 2008]
- Yu F. T. S., Wu S., Rajan S., Gregory D. A., Compact joint transform correlator with a thick photorefractive crystal // *Applied Optics*.— 1992.— Vol. 31, N. 14.— P. 2416—2418.
- Colin J., Landru N., Laude V. et al. High-speed photorefractive joint transform correlator using nonlinear filters // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*.— 1999.— Vol. 1, N. 2.— P. 283—285.
- Ryf R., Montemezzani G., Gunter P. et al. High-frame-rate joint Fourier-transform correlator based on $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ crystal // *Optics Letters*.— 2001.— Vol. 26, N. 21.— P. 1666—1668.
- Суй А. В., Строганов В. И., Лихтин В. В. Запись изображения в легированных кристаллах ниобата лития // *Физика твердого тела*.— 2009.— Т. 51, вып. 7.— С. 1382—1384. [Syui A. V., Stroganov V. I., Likhtin V. V. Z // *Fizika tverdogo tela*. 2009. Vol. 51, Iss. 7. P. 1382]
- Каншу А. В., Круглов В. Г., Ващенко И. В., Шандаров В. М. Фоторефрактивные фазовые транспаранты для коррекции амплитудных профилей световых пучков // Докл. междунар. науч.-практич. конф. «Электронные средства и системы управления».— Россия, Томск, ТУСУР.— 2005.— С. 201—204. [Kanshu A. V., Kruglov V. G., Vashchenko I. V., Shandarov V. M. Fotorefraktivnye fazovye transparenty dlya korrektsii amplitudnykh profilei svetovykh puchkov // *Dokl. mezhdunar. nauch.-praktich. konf. «Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya»*. Russia, Tomsk, TUSUR. 2005. P. 201]
- VanderLugt A. B. Signal detection by complex spatial filtering // *IEEE Trans. Inf. Theory* IT-10.— 1964.— P. 139—148.
- Goodman J. Introduction to Fourier Optics.— New York, McGraw-Hill, 1968.— P. 141—147.
- Hudson T. D., Gregory D. A. Joint transform correlation using an optically addressed ferroelectric LC spatial light modulator // *Applied Optics*.— 1990.— Vol. 29, N. 8.— P. 1064—1066.
- Gheen G., Cheng L. J. Optical correlators with fast updating speed using photorefractive semiconductor materials // *Applied Optics*.— 1988.— Vol. 27, N. 13.— P. 2756—2761.
- Федоров И. Ю., Ангервакс А. Е., Соколов В. К., Шеулин А. С. Динамический голографический коррелятор совместного преобразования Фурье на основе кристалла $\text{CdF}_2:\text{Ga}$ // *Оптика и спектроскопия*.— 2008.— Т. 105, № 6.— С. 1045—1055. [Fedorov I. Yu., Angervaks A. E., Sokolov V. K., Sheulin A. S. // *Optika i spektroskopiya*.— 2008. Vol. 105, N 6. P. 1045]
- Uesu Y., Yasukawa K., Saito N. et al. Dynamic grating recording in semiconductor $\text{CdF}_2:\text{Ga}$, Y // *Journal of the Optical Society of America B*.— 2003.— Vol. 20, N. 9.— P. 1905—1911.
- Acoustooptic Memory Correlator / Pat. 4139237, U.S.A., Berg N. J., Smith B. L.— 1979.
- Yu F. T. S., Yin S. Photorefractive Optics: Materials, Properties, and Applications.— San Diego, CA: Academic Press, 2000.
- Петров М. П., Степанов С. И., Хоменко А. В. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике.— СПб.: Наука. С.-Петербургское отд. 1992. [Petrov M. P., Stepanov S. I., Khomenko A. V. Fotorefraktivnye kristally v kogerentnoi optike. SPb. Nauka. S.-Peterburgskoe otd. 1992]
- Липинский А. Ю., Рудякова А. Н. Моделирование фоторефрактивного изменения показателя преломления в кристалле LiNbO_3 // *Всеекр. межвед. науч.-техн. сб. «Радиотехника»*.— 2011.— №164.— С. 150—154. [Lipinskii A. Yu., Rudyakova A. N. // *Vseukr. mezhdved. nauch.-tekhn. sb. «Radiotekhnika»*. 2011. N 164. P. 150]
- Liu J. J., Banerjee P. P., Song Q. W., Role of diffusive, photovoltaic, and thermal effects in beam fanning in LiNbO_3 // *Journal of the Optical Society of America B*.— 1994.— Vol. 11, Iss. 9, P. 1688—1693.
- Липинский А. Ю., Рудякова А. Н. Моделирование коррелятора с акустооптической памятью // *Сб. тр. III Междунар. науч. конф. «Функциональная компонентная база микро-, опто- и наноэлектроники»*.— Украина, г. Харьков, Кацивели, 2010.— С. 45—48. [Lipinskii A. Yu., Rudyakova A. N. Modelirovanie korrelyatora s akustoopticheskoi pamyat'yu // *Sb. tr. III Mezhdunar. nauch. konfer. «Funktsional'naya komponentnaya baza mikro-, opto- i nanelektroniki»*. Ukraine, Kharkov, Katsiveli. 2010. P. 45]
- Рудякова А. Н., Липинский А. Ю., Данилов В. В. Оптоэлектронные акустооптические устройства обработки дискретной информации // *Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій*.— 2007.— Т. 5, № 4.— С. 51—59. [Rudyakova A. N., Lipinskii A. Yu., Danilov V. V. // *Visnik Derzhavnogo universitetu informatsiino-komunikatsiinih tekhnologii*. 2007. Vol. 5, N 4. P. 51]
- Липинский А. Ю., Рудякова А. Н., Рудяков Ю. И., Данилов В. В. Устройство формирования элементов оптоэлектронной акустооптической вычислительной среды // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*.— 2010.— № 3.— С. 9—12. [Lipinskii A. Yu., Rudyakova A. N., Rudyakov Yu. I., Danilov V. V. // *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparatyre*. 2010. N 3. P. 9]

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ИЗБЫТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ИЗМЕРЯЕМОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ВЕЛИЧИНЫ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ДАТЧИКА

Рассмотрены вопросы повышения точности измерений физических величин при использовании измерительного канала с нелинейной градуировочной характеристикой.

Научно-техническая задача создания методов повышения точности измерения физических величин (ФВ) при использовании измерительных каналов с нелинейными градуировочными характеристиками была и остается актуальной. Сложность этой задачи обусловлена тем, что одновременно с линейризацией градуировочной характеристики необходимо уменьшить погрешность измерений, связанную с изменением условий их проведения. Данная составляющая систематической погрешности измерений вызвана отклонением в одну сторону от установленного значения какого-либо из параметров, характеризующих условия измерений [1].

В измерительной технике для линейризации градуировочной характеристики и коррекции систематической погрешности измерений широко применяются методы, которые основаны на получении избыточной информации — дополнительной информации не только об измеряемой физической величине, но и о погрешностях, допускаемых при измерениях. Такие методы получили название «алгоритмические методы автоматической коррекции погрешностей» [2, 3]. Среди них наиболее обширной группой являются методы избыточных измерений [4], возникшие в результате эволюции методов образцовых мер и тестовых методов.

При выборе того или иного подхода к получению информационной избыточности на передний план выступают вопросы, связанные с возможностью его физической реализации. Одной из встречающихся на практике проблем является невозможность прекращения воздействия измеряемой физической величины на чувствительный элемент датчика (первичного измерительного преобразователя).

Целью настоящей работы является создание математической модели процесса избыточных измерений при непрерывном воздействии измеряемой физической величины на чувствительный элемент датчика.

Математическая модель градуировочной характеристики измерительного канала

В [5, 6] отмечается, что в качестве обобщенной математической модели встречающихся на практике градуировочных характеристик измерительных каналов может быть принята функция преобразования (ФП) вида

$$y = y_0 + S_{\text{л}}x + S_{\text{н1}}x^2 + \dots + S_{\text{нn}}x^{n+1}, \quad (1)$$

где x — измеряемая физическая величина; y — выходная величина измерительного канала; y_0 , $S_{\text{л}}$, $S_{\text{н1}}$, ..., $S_{\text{нn}}$ — параметры ФП; n — степень полинома.

Известно, что когда градуировочная характеристика измерительного канала описывается полиномом высокой степени, требуется проведение значительного числа промежуточных измерений. Это приводит к росту погрешности, вызванной изменением значения измеряемой физической величины в процессе избыточных измерений. В связи с этим в [5] рекомендуется использовать кусочно-параболическую аппроксимацию градуировочной характеристики, которая позволяет снизить степень аппроксимирующего полинома увеличением числа аппроксимирующих парабол вида $y = y_0 + S_{\text{л}}x + S_{\text{н}}x^2$. Однако данный подход нельзя признать универсальным по следующей причине. Залогом успешного решения задачи автоматической коррекции погрешностей является выбор оптимальных значений корректирующих величин. Если диапазон значений измеряемой ФВ разбивается на несколько поддиапазонов, то каждому из них будут соответствовать свои оптимальные значения корректирующих физических величин. Следовательно, реализация методов избыточных измерений будет возможна только при наличии многозначной меры или магазина мер.

Ввиду этого представляется целесообразным не разбивать диапазон значений измеряемой физической величины на поддиапазоны, но ограничиться в ФП (1) четырьмя первыми членами. В этом случае для физической реализации метода избыточных измерений потребуются лишь три однозначные меры и масштабный измерительный преобразователь. С учетом этого прием математическую модель градуировочной характеристики измерительного канала в виде

$$y = S_{\text{н2}}x^3 + S_{\text{н1}}x^2 + S_{\text{л}}x + y_0.$$

Тогда реальную функцию преобразования измерительного канала можно записать следующим образом:

$$y = S'_{n2}x^3 + S'_{n1}x^2 + S'_l x + y'_0, \quad (2)$$

где $S'_{n2}, S'_{n1}, S'_l, y'_0$ — параметры реальной ФП, учитывающие влияние дестабилизирующих факторов на измерительный канал.

При этом значения параметров реальной ФП определяются как

$$\{S'_{n2}\} = \{S_{n2}\}(1 + \gamma_{n2}); \quad \{S'_{n1}\} = \{S_{n1}\}(1 + \gamma_{n1}); \\ \{S'_l\} = \{S_l\}(1 + \gamma_l); \quad \{y'_0\} = \{y_0\}(1 + \gamma_{y0}),$$

где $\{S_{n2}\}, \{S_{n1}\}, \{S_l\}, \{y_0\}$ — номинальные значения параметров ФП; $\gamma_{n1}, \gamma_{n2}, \gamma_l, \gamma_{y0}$ — относительные изменения значений параметров ФП, обусловленные процессами старения, а также влиянием дестабилизирующих факторов на измерительный канал.

Математическая модель процесса избыточных измерений

Анализ ФП (2) показал, что решение задачи автоматической коррекции погрешностей возможно при использовании группы из шести корректирующих физических величин (**КрФВ**) x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 и x_6 со следующими значениями: $\{x_1\} = \{x\}$, $\{x_2\} = \{x\} + \{x_{m1}\}$, $\{x_3\} = \{x\} + \{x_{m2}\}$, $\{x_4\} = \{x\} + \{x_{m3}\}$, $\{x_5\} = \{x\}/k_{л1}$, $\{x_6\} = k_{л1}\{x\}$. Здесь $\{x_{m1}\}, \{x_{m2}\}, \{x_{m3}\}$ — нормированные значения физических величин, воспроизводимых мерами ($\{x_{m1}\} = \{x_0\} + \{\Delta x_0\}$, $\{x_{m2}\} = \{x_0\}$, $\{x_{m3}\} = \{x_0\} + \{\Delta x_0\}$); $k_{л1}$ — первый коэффициент локальной линеаризации. Следует отметить, что в соот-

ветствии с теорией избыточных измерений [4] значения $\{x_2\}, \{x_3\}$ и $\{x_4\}$ образуют арифметическую прогрессию, а $\{x_1\}, \{x_5\}$ и $\{x_6\}$ — геометрическую.

Если измерения искомой ФВ x проводятся методом избыточных измерений первого рода, то систему когерентных нелинейных уравнений связи между величинами можно представить в виде

$$\begin{cases} y_1 = S'_{n2}x_1^3 + S'_{n1}x_1^2 + S'_l x_1 + y'_0, \\ y_2 = S'_{n2}x_2^3 + S'_{n1}x_2^2 + S'_l x_2 + y'_0, \\ y_3 = S'_{n2}x_3^3 + S'_{n1}x_3^2 + S'_l x_3 + y'_0, \\ y_4 = S'_{n2}x_4^3 + S'_{n1}x_4^2 + S'_l x_4 + y'_0, \\ y_5 = S'_{n2}x_5^3 + S'_{n1}x_5^2 + S'_l x_5 + y'_0, \\ y_6 = S'_{n2}x_6^3 + S'_{n1}x_6^2 + S'_l x_6 + y'_0. \end{cases} \quad (3)$$

Решение этой системы относительно искомой ФВ x представлено уравнениями избыточных измерений (4)–(8), где x_d — действительное значение физической величины x ; $k_1=1$; $k_2=2$.

Физический смысл приведенной математической модели состоит в следующем. Сначала на вход измерительного канала подается искомая физическая величина x ($\{x_1\} = \{x\}$), которая подвергается измерительному преобразованию в ФВ y_1 . Затем с помощью первой меры формируется ФВ x_{m1} , значение которой с заданной точностью равно $\{x_{m1}\} = \{x_0\} + \{\Delta x_0\}$. Данная ФВ поступает на вход измерительного канала одновременно с искомой ФВ x . Корректирующая ФВ x_2 , значение которой равно сумме значений физических величин x_{m1} и x ($\{x_2\} = \{x\} + \{x_0\} + \{\Delta x_0\}$), подвергается измерительному преобразованию в физи-

$$\frac{x_0^2(y_2 + y_4 - k_2 y_3) + x_0 \Delta x_0 (y_2 - y_4) + k_2 \Delta x_0^2 (y_3 - y_1)}{k_2 x_0 \Delta x_0^2 (x_0^2 - \Delta x_0^2)} \left(\frac{k_1}{k_{л1}} - k_{л1} \right) = \\ = \frac{x_d^2 (k_{л1}^2 - k_1)(k_{л1} - k_1)(y_3 - y_1) - x_0 (k_{л1}^2 [(k_{л1} - k_1)x_d - x_0](y_1 - y_5) + [k_{л1}(x_d + x_0) - x_d](y_6 - y_1))}{x_d^2 x_0 (k_{л1} - k_1)[k_{л1}(x_d + x_0) - x_d][(k_{л1} - k_1)x_d - x_0]}; \quad (4)$$

$$S_{n2d} = \frac{k_2 \Delta x_0^2 (y_3 - y_1) + x_0 \Delta x_0 (y_2 - y_4) + x_0^2 (y_2 + y_4 - k_2 y_3)}{k_2 x_0 \Delta x_0^2 (x_0^2 - \Delta x_0^2)}; \quad (5)$$

$$S_{n1d} = k_{л1} \frac{y_6 - y_1 - k_{л1}(y_1 - y_5)}{x_d^2 (k_{л1} - k_1)^2 (k_{л1} + k_1)} - x_d \left(k_{л1} + \frac{k_1}{k_{л1}} + k_1 \right) \frac{k_2 \Delta x_0^2 (y_3 - y_1) + x_0 \Delta x_0 (y_2 - y_4) + x_0^2 (y_2 + y_4 - k_2 y_3)}{k_2 x_0 \Delta x_0^2 (x_0^2 - \Delta x_0^2)}; \quad (6)$$

$$S_{лд} = \frac{k_{л1}^2 (y_1 - y_5) - (y_6 - y_1)}{x_d (k_{л1} - k_1)^2} + x_d^2 \left(k_{л1} + \frac{k_1}{k_{л1}} + k_1 \right) \frac{k_2 \Delta x_0^2 (y_3 - y_1) + x_0 \Delta x_0 (y_2 - y_4) + x_0^2 (y_2 + y_4 - k_2 y_3)}{k_2 x_0 \Delta x_0^2 (x_0^2 - \Delta x_0^2)}; \quad (7)$$

$$y_{0д} = \frac{k_{л1} [k_{л1}^2 y_5 - y_1 (k_{л1} + k_1)] + y_6}{(k_{л1} - k_1)^2 (k_{л1} + k_1)} - x_d^3 \frac{k_2 \Delta x_0^2 (y_3 - y_1) + x_0 \Delta x_0 (y_2 - y_4) + x_0^2 (y_2 + y_4 - k_2 y_3)}{k_2 x_0 \Delta x_0^2 (x_0^2 - \Delta x_0^2)}. \quad (8)$$

ческую величину y_2 . Аналогичным образом при помощи второй и третьей мер осуществляется формирование КрФВ x_3 и x_4 с их последующим измерительным преобразованием в ФВ y_3 и y_4 соответственно.

Далее искомая физическая величина подается на вход масштабного измерительного преобразователя, обеспечивающего формирование КрФВ x_5 , которая затем поступает на вход измерительного канала и подвергается измерительному преобразованию в ФВ. Аналогичным образом осуществляется формирование КрФВ x_6 и ее измерительное преобразование в ФВ y_6 .

Полученные результаты промежуточных измерений обрабатываются в соответствии с уравнением избыточных измерений (4), из которого не сложно определить действительное значение $\{x_d\}$ искомой ФВ x . Поскольку в уравнение избыточных измерений (4) не входят параметры ФП измерительного канала, становится очевидным, что оно обеспечивает автоматическую коррекцию погрешности измерений из-за изменения условий измерений. При этом также достигается линейная зависимость между значением измеряемой физической величины $\{x\}$ и результатом избыточных измерений $\{x_d\}$.

Полученная математическая модель процесса избыточных измерений может также быть использована при решении задачи оценивания метрологической надежности средств измерений [4]. Решение такой задачи осуществляется путем обработки результатов промежуточных измерений по уравнениям избыточных измерений (5) — (8), которые позволяют определить действительные значения $\{S_{n2d}\}$, $\{S_{n1d}\}$, $\{S_{ld}\}$ и $\{y_{0d}\}$ параметров ФП измерительного канала. Контролируя изменения этих параметров за время измерений, можно сделать выводы о воздействии дестабилизирующих факторов на средство измерения, а контролируя их изменения за интервал времени, со-

измеримый со средним сроком службы, можно судить о деградации измерительного канала и средства измерения в целом.

Таким образом, разработанная математическая модель процесса избыточных измерений позволяет определить действительные значения параметров функции преобразования измерительного канала на момент его изготовления и в процессе эксплуатации.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. РМГ 29-99. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. — М.: ИПК. Изд-во стандартов, 2000. [RMG 29-99. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenii. Metrologiya. Osnovnyye terminy i opredeleniya. Moscow. IPK. Izd-vo standartov, 2000]
2. Земельман М. А. Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств. — М.: Изд-во стандартов, 1972. [Zemel'man M. A. Avtomaticheskaya korrektsiya pogreshnostei izmeritel'nykh ustroystv. Moscow. Izd-vo standartov, 1972]
3. Кондратов В. Т. Методы и средства линеаризации градуировочных характеристик датчиков и средств измерений. Часть 3. Методы аппроксимации характеристик, методы образцовых мер, итерационные и тестовые методы / Препринт. Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова НАНУ. — Киев, 1998. [Kondratov V. T. / Preprint. In-t kibernetiki im. V. M. Glushkova NANU. Kiev, 1998]
4. Кондратов В. Т. Фундаментальная теория избыточных измерений: особенности и обобщенная структура // Законодательная и прикладная метрология. — 2009. — № 4 (104). — С. 2—15. [Kondratov V. T. // Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya. 2009. N 4 (104). P. 2]
5. Бромберг Э. М., Куликовский К. Л. Тестовые методы повышения точности измерений. — М.: Энергия, 1972. [Bromberg E. M., Kulikovskii K. L. Testovye metody povysheniya tochnosti izmerenii. Moscow. Energiya, 1972]
6. Семенов Л. А., Сирая Т. Н. Методы построения градуировочных характеристик средств измерений. — М.: Изд-во стандартов, 1986. [Semenov L. A., Siraya T. N. Metody postroeniya graduirovochnykh kharakteristik sredstv izmerenii. Moscow. Izd-vo standartov, 1986]

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Суминов И. В., Белкин П. Н., Эпельфельд А. В., Людин В. Б., Крит Б. Л., Борисов А. М. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. В 2 томах. Т. 1. — Москва: Техносфера, 2010. — 464 с.

В книге рассмотрены явления катодного и анодного нагрева токопроводящих материалов в водных растворах электролитов; процессы локального вскипания электролитов в окрестности электрода с малой поверхностью, формирование сплошной и устойчивой парогазовой оболочки, электрическая проводимость в парогазовой среде, теплофизические и электрохимические аспекты анодного варианта нагрева. Дан критический обзор результатов применения анодного нагрева с целью закалки, нитрозакалки среднеуглеродистых или инструментальных сталей, цементации и нитроцементации конструкционных сталей или железуглеродистых, оксидированию стальных или титановых сплавов. Описаны фазовый состав, структура и эксплуатационные свойства упрочненных материалов. Изложены способы и устройства для нагрева металлов и сплавов в электролите, режимы обработки, составы электролитов и результаты их практического использования.

Для научных работников, инженеров, а также преподавателей, аспирантов и студентов физических, химических и технических специальностей.



К. т. н. А. А. АЛТУХОВ¹, к. ф.-м. н. К. Н. ЗЯБЛЮК¹,
д. ф.-м. н. А. Ю. МИТЯГИН², к. ф.-м. н. Н. Х. ТАЛИПОВ²,
д. ф.-м. н. Г. В. ЧУЧЕВА²

УДК 621.382.3

Россия, г. Фрязино, ¹ПТЦ УралАлмазИнвест;
²Фрязинский филиал ИПЭ им. В. А. Котельникова РАН
E-mail: alexandr-mityagin@yandex.ru

Дата поступления в редакцию
30.06 2011 г.

МОДЕЛЬ АЛМАЗНОГО СВЧ-ТРАНЗИСТОРА

Модель плавного затвора позволяет рассчитать характеристики полевых алмазных СВЧ-транзисторов по электрофизическим параметрам алмазной структуры с δ -легированным слоем и по геометрическим параметрам элементов транзистора.

Основной тенденцией развития СВЧ-электроники в настоящее время является рост числа исследований в области разработки приборов на основе широкозонных полупроводников, в частности алмаза. Наиболее перспективным вариантом считается полевой (униполярный) транзистор на основе алмаза с модулируемым проводящим каналом. В настоящий момент ведутся работы по исследованию алмазных транзисторов двух основных конструкций в зависимости от типа проводящего канала: с каналом n -типа в виде δ -легированного бором слоя и с каналом p -типа на гидрированной поверхности алмаза [1]. Алмазные транзисторы второго типа основаны на поверхностной проводимости гидрированного алмаза.

Обнаружено, что при обработке в водородной плазме алмаз приобретает поверхностную проводимость дырочного типа [2]. Такая поверхность алмаза насыщена C–H-связями и называется гидрированной (или гидрогенизированной). Исследования показали, что проводящий канал находится на глубине около 10 нм под поверхностью и обладает толщиной около 1 нм, т. е. фактически является вышеупомянутым δ -слоем или так называемым двумерным дырочным газом. Такие свойства гидрированного алмаза позволяют изготовить полевой транзистор на его основе [1–5].

Для проведения исследований таких транзисторов нужна модель, которая бы достаточно хорошо описывала их работу. В настоящей работе предложена модель, позволяющая рассчитать характеристики подобных полевых алмазных транзисторов по электрофизическим параметрам алмазного материала и геометрическим параметрам электродов.

Конструкция СВЧ-транзистора

В качестве основной конструкции СВЧ-транзистора выбран полевой транзистор на основе алмазной пленки с проводящей гидрированной поверхностью, схема которого представлена на рис. 1. Контакты истока и стока изготавливаются из металла, образующего с гидрированной поверхностью алмаза омиче-

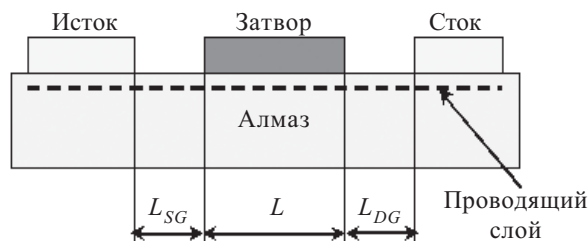


Рис. 1. Схема полевого транзистора на гидрированной поверхности алмаза

ский контакт (как правило, из золота), а затвора — образующего барьерный контакт Шоттки (как правило, из алюминия).

Расчеты проводились для транзистора с затвором Шоттки как наиболее простой конструкции. Они могут быть легко обобщены на транзисторы типа «металл—диэлектрик—полупроводник», в которых между полупроводником и контактом затвора имеется слой диэлектрика.

Для достижения высокого тока «исток—сток» и максимальных рабочих частот транзистора длина затвора L должна быть минимальной, что определяется доступными технологиями. Длины зазоров контактов «исток—затвор» L_{SG} и «сток—затвор» L_{DG} также должны быть минимальными для уменьшения сопротивления входных участков. Минимальная величина зазоров определяется не только возможностями технологии, но и требованием недопустимости пробоя при максимальных рабочих напряжениях. Ширина затвора определяет характеристики транзистора.

Модель плавного канала

Рассмотрим полевой транзистор с длиной затвора L и шириной W . Пусть ось x — вдоль затвора, ось y направлена вглубь полупроводника. Пренебрежем расстояниями между затвором и истоком и затвором и стоком (в дальнейшем они будут учтены как вне-

Работа выполнена в рамках проекта
РФФИ № 11-07-00288.

шние сопротивления). При условии малости продольного поля по сравнению с поперечным ($E_x > E_y$) под затвором образуется проводящий канал вдоль оси x , что называется приближением плавного канала. Формула для вычисления плотности тока в канале в направлении оси x имеет вид:

$$J = qnv, \quad (1)$$

где q — элементарный заряд;
 n — объемная плотность носителей заряда;
 v — скорость носителей заряда вдоль оси x .

При малых значениях напряженности поля E скорость носителей заряда линейно зависит от напряжения: $v = \mu E$, где μ — подвижность носителей. При скоростях около 10^7 см/с происходит насыщение скорости носителей заряда в алмазе, что может быть учтено с помощью следующей зависимости:

$$v = \mu E / (1 + \mu E / v_s), \quad (2)$$

где v_s — скорость насыщения.

В статическом случае $(\text{rot} E)_z = d_x E_y - d_y E_x = 0$, и при достаточной плавности канала (слабая зависимость n, E_y от x) компонента E_x слабо зависит от y . Поэтому в предположении независимости μ и E_x от координаты y можно проинтегрировать уравнения (1), (2) по y и получить поверхностную плотность тока

$$j_s = Q_s(x) \frac{\mu V'(x)}{1 + \mu V'(x) / v_s} = \frac{I_{DS}}{W}, \quad (3)$$

где $Q_s(x)$ — поверхностная плотность заряда,
 $Q_s(x) = q \int dy n(x, y)$;
 $V(x)$ — потенциал непосредственно под каналом;
 I_{DS} — ток «исток—сток».

В модели плавного канала поверхностная плотность заряда описывается следующим образом:

$$Q_s(x) = C_i [V_{GS} - V_T - V(x)], \quad (4)$$

где C_i — поверхностная емкость подзатворного диэлектрического слоя;

V_{GS} — напряжение затвора относительно истока;
 V_T — некое пороговое напряжение, определяемое свойствами поверхности «затвор—диэлектрик (полупроводник)».

В стационарном случае $I_{DS} = \text{const}$, и уравнение (3) может быть проинтегрировано с учетом граничного условия $V(0) = 0$. Далее, решая квадратное уравнение и применяя граничные условия $V(0) = 0$, $V(L) = V_{DS}$ (V_{DS} — напряжение стока относительно истока), можно получить распределение потенциала вдоль канала и вольт-амперную характеристику (**ВАХ**) при условии, что ток I_{DS} не превышает тока насыщения I_{DSsat} :

$$I_{DS} < I_{DSsat} \equiv \frac{\mu C_i W}{L} \frac{V_{DSat}^2}{2}. \quad (5)$$

Здесь V_{DSat} — напряжение насыщения (при $V_{DS} > V_{DSsat}$ с ростом напряжения значение тока «исток—сток» остается постоянным: $I_{DS} = I_{DSsat}$):

$$V_{DSsat} \equiv V_s \left(\sqrt{1 + 2 \frac{U}{V_s}} - 1 \right),$$

где потенциал V_s определяется как

$$V_s \equiv v_s L / \mu.$$

В реальных транзисторах контакты должны находиться на определенных расстояниях друг от друга во избежание пробоя, особенно на участке «затвор—сток» в режиме насыщения $V_{DS} > V_{GS} - V_T$. Чтобы учесть сопротивление конечных межэлектродных промежутков, можно использовать эквивалентную схему транзистора, включающую сопротивления участков «исток—затвор» R_S и «затвор—сток» R_D (рис. 2).

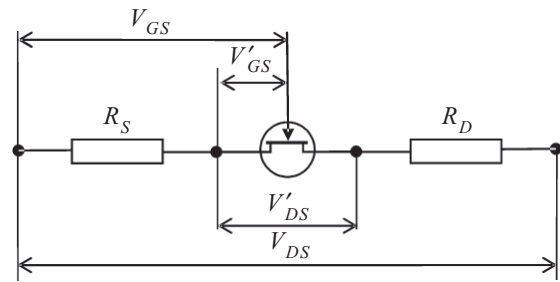


Рис. 2. Эквивалентная схема полевого транзистора с учетом сопротивлений участков «исток—затвор» и «затвор—сток»

Обозначим через V'_{GS} и V'_{DS} «внутренние» напряжения в полевом транзисторе, т. е. без учета участков «исток—затвор» и «затвор—сток». Согласно схеме на рис. 2 напряжения в транзисторе с учетом этих участков равны

$$V_{GS} = V'_{GS} + \frac{R_S I_{DS}}{1 - R_S I_{DS} \mu / (v_s L_{GS})}; \quad (6)$$

$$V_{DS} = V'_{DS} + \frac{R_S I_{DS}}{1 - R_S I_{DS} \mu / (v_s L_{SG})} + \frac{R_D I_{DS}}{1 - R_D I_{DS} \mu / (v_s L_{DG})}, \quad (7)$$

где L_{SG} , L_{DG} — длины участков «исток—затвор» и «затвор—сток» (см. рис. 1). Ток «исток—сток» здесь определяется «внутренними» напряжениями транзистора как $I_{DS} = I_{DS}(V'_{GS}, V'_{DS})$.

В дальнейшем для напряжений затвора, отсчитываемых от напряжения отсечки V_T , для удобства будем использовать обозначения

$$U \equiv V_{GS} - V_T;$$

$$U' \equiv V'_{GS} - V_T.$$

В режиме насыщения ток I_{DS} не зависит от напряжений V_{DS} , V'_{DS} . Согласно уравнению (6) можно получить уравнение, связывающее «внутреннее» напряжение затвора U' с «внешним» U . Его решение в виде $U'(U)$ не может быть выражено в терминах аналитических функций, поэтому должно решаться численно. Решение должно удовлетворять условию $0 < U' < U$.

Вычислив U' , можно найти «внутреннее» напряжение насыщения V'_{DSsat} , а затем V_{DSsat} по уравнению (7). Для режима, предшествующего насыщению, т. е. при $V_{DS} < V_{DSsat}$ в случае когда $L_{SG} = L_{DG}$ внутреннее напряжение затвора U' можно найти аналитически. При $R_S = R_D = R$ получим

$$U - U' = \frac{V_{DS} + V_s + AB - \sqrt{[V_{DS} + V_s + AB]^2 - 8BDV_{DS}}}{4D}, \quad (8)$$

где $A = 2 - V_{DS}/V_{s1}$; $B = R\mu C_i(W/L)V_s(U - V_{DS}/2)$;

$$D = 1 - B/V_{s1}; \quad V_{s1} = v_s L_1/\mu.$$

Для проверки модели были использованы данные, опубликованные по алмазным полевым транзисторам [3—7]. Эти транзисторы изготавливались на гидрированной поверхности алмаза, обладающей проводимостью p -типа с поверхностной концентрацией носителей заряда $(0,5—1,0) \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью $\mu = 50—150 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при комнатной температуре. Для

проведения расчетов и дальнейшего сравнения вольт-амперных характеристик был выбран образец с максимальной удельной плотностью тока в статическом режиме: $I_{DS}/W = 550 \text{ мА/мм}$ [7]. Образец был изготовлен на поликристаллическом алмазе с кристаллической ориентацией (110), контакты стока и истока — из золота, затвора — из алюминия. Длина затвора $L = 0,1 \text{ мкм}$, ширина затвора $W = 50 \text{ мкм}$, расстояния «сток—затвор» и «затвор—исток» $L_{SG} = L_{GD} = 0,5 \text{ мкм}$. Поскольку в [7] не приводятся значения μ , ρ и C_i для данного образца, для расчета были взяты усредненные для подобных транзисторов значения подвижности и поверхностного сопротивления: $\mu = 100 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $\rho = 7 \text{ кОм}$. При этих исходных данных значения сопротивления участков «сток—затвор» и «затвор—исток» составили $R_S = R_D = \rho L_{SG}/W = 70 \text{ Ом}$, как в модели транзистора в [8]. Удельная емкость подзатворного слоя была определена для другого образца из вольт-фарадных характеристик в [4]: $C_i \approx 1 \text{ мкФ/см}^2$ в диапазоне напряжений $V_{GS} = -2 \dots 0 \text{ В}$. Переход от p -типа транзистора к n -типу учитывался заменой знаков в значениях напряжений «сток—исток», «затвор—исток», тока «исток—сток». Напряжение отсечки при расчетах ВАХ в соответствии с этим выбрали равным $V_T = 1 \text{ В}$. Рассчитанные по модели плавного канала с учетом сопротивлений R_S и R_D вольт-амперные характеристики и кривые их крутизны вместе с выбранными для сравнения экспериментальными данными из [7] приведены на рис. 3 и 4. Здесь видно

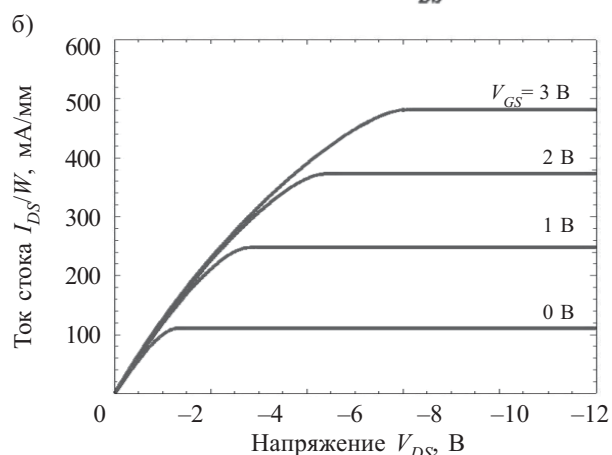
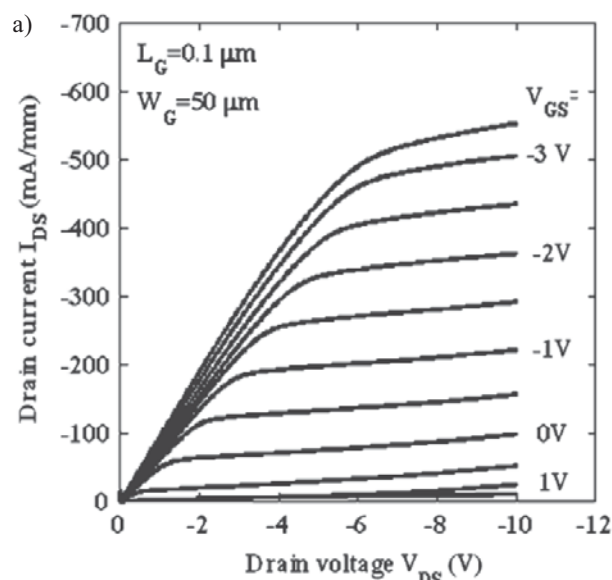


Рис. 3. ВАХ алмазного полевого транзистора, полученная экспериментально в [7] (а) и рассчитанная в настоящей работе (б), для различных значений напряжения V_{GS}

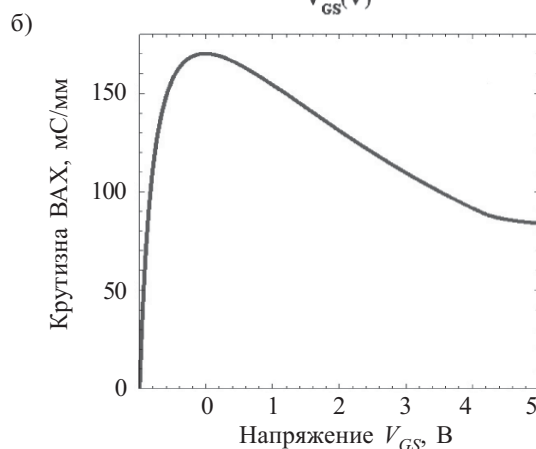
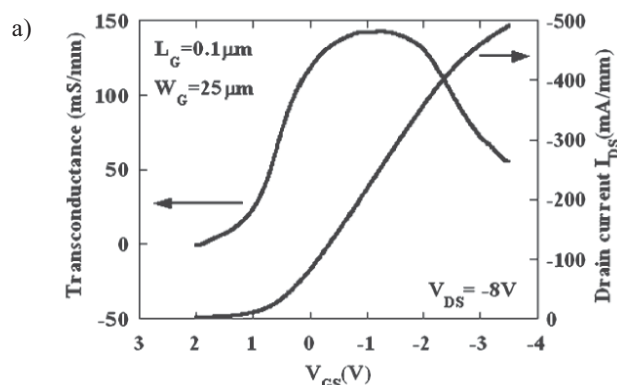


Рис. 4. Крутизна ВАХ алмазного полевого транзистора, полученная экспериментально в [7] (а) и рассчитанная в настоящей работе (б) при $V_{DS} = 8 \text{ В}$

качественное согласование приведенных данных. Отличия могут быть объяснены рядом неучтенных эффектов, например зависимостью подвижности носителей заряда от напряженности поля, зависимостью емкости подзатворного слоя C_i от напряжений, высоким значением напряженности поля на участке «затвор—сток» в режиме насыщения и пр.

Модель плавного канала в случае переменного тока

Рассмотрим модель плавного канала в случае переменного тока. Напряжение, подаваемое на транзистор, состоит из постоянного напряжения смещения и переменной синусоидальной части. Рассмотрим подзатворный слой. Предположим, что длина волны много больше размеров транзистора, и тогда очевидно, что поверхностная плотность тока (3) и поверхностная плотность заряда (4) зависят от времени t . Поэтому вместо формул (3) и (4) запишем

$$j_s(x, t) = Q_s(x, t) \frac{\mu \partial_x V(x, t)}{1 + \mu \partial_x V(x, t) / v_s};$$

$$Q_s(x, t) = C_i [V_{GS}(t) - V_T - V(x, t)]. \quad (9)$$

В случае переменного тока j_s удовлетворяет условию непрерывности

$$\frac{\partial j_s(x, t)}{\partial x} + \frac{\partial Q_s(x, t)}{\partial t} = 0. \quad (10)$$

Граничные условия для потенциала $V(x, t)$:

$$V(0, t) = 0, \quad V(L, t) = V_{DS}(t). \quad (11)$$

Значения тока на границах канала

$$Wj_s(L, t) = I_D(t); \quad W[j_s(L, t) - j_s(0, t)] = I_G(t), \quad (12)$$

где I_D — ток, вытекающий из стока; I_G — ток втекающий в затвор (без учета вклада участков «исток—затвор» и «затвор—сток»).

Решение уравнений (9), (10) с граничными условиями (11), (12) дают характеристики транзистора в случае переменного тока в данной модели.

Далее предположим, что емкость C_i не зависит от потенциалов. Для удобства введем обозначения

$$U(t) = V_{GS}(t) - V_T; \quad F(x, t) = V_{GS}(t) - V_T - V(x, t). \quad (13)$$

Уравнение непрерывности (10) с учетом (9) в этих обозначениях принимает вид

$$\frac{\partial F(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(1 - \frac{\mu}{v_s} \frac{\partial F(x, t)}{\partial x} \right)^{-1} \times \right. \\ \left. \times \mu F(x, t) \frac{\partial F(x, t)}{\partial x} \right]. \quad (14)$$

Наибольшую мощность транзистор развивает при больших напряжениях стока V_{DS} . Так как напряжение затвора (от напряжения отсечки) ограничено напряжением пробоя $U = 5 \dots 8$ В (для затворов Шоттки), транзистор в этом случае работает в режиме насыщения. Поэтому далее ограничимся расчетом режима работы транзистора, в котором условие насыще-

ния $V_{DS}(t) > V_{DSsat}(t)$ выполняется для любого момента времени t .

Напряжение, подаваемое на транзистор, состоит из постоянного напряжения смещения и синусоидальной части. Поэтому естественно представить потенциалы U, F в виде суммы постоянной части и зависящих от времени потенциалов, обращающихся в 0 в стационарном случае:

$$U(t) = U + u(t);$$

$$F(x, t) = U - V_{DSsat} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{x}{L}} \right) + f(x, t). \quad (15)$$

Для удобства в дальнейшем введем безразмерный параметр γ и безразмерную координату \tilde{x} :

$$\gamma = \frac{V_{DSsat}}{2V_s} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 2 \frac{U}{V_s}} - 1 \right); \quad \tilde{x} = 1 - \frac{x}{L}. \quad (16)$$

В данных обозначениях уравнение непрерывности (14) приобретает вид

$$\frac{\partial f(\tilde{x}, t)}{\partial t} = \frac{v_s}{L} \frac{\partial}{\partial \tilde{x}} \left\{ \left[2\gamma(\gamma + \sqrt{\tilde{x}})V_s + f(\tilde{x}, t) \right] \times \right. \\ \left. \times \frac{\gamma V_s + \sqrt{\tilde{x}} \partial_{\tilde{x}} f(\tilde{x}, t)}{(\gamma + \sqrt{\tilde{x}})V_s + \sqrt{\tilde{x}} \partial_{\tilde{x}} f(\tilde{x}, t)} \right\}. \quad (17)$$

Граничное условие со стороны истока:

$$f(\tilde{x} = 1, t) = u(t).$$

Уравнение (17) выполняется автоматически в стационарном случае ($f=0$). Согласно (12), функция f при $\tilde{x}=0$ определяет ток стока полевого транзистора:

$$I_D(t) = I_D + i_d(t), \quad (18)$$

где $i_d(t) = WC_i v_s f(0, t)$, $I_D = 2\gamma^2 WC_i v_s V_s$.

Здесь постоянная часть I_D совпадает с током «исток—сток» (5) в режиме насыщения в стационарном случае.

Ток затвора зависит от производной

$$I_D(t) - I_G(t) = WC_i v_s \left[2\gamma(\gamma + 1)V_s + u(t) \right] \times \\ \times \frac{\gamma V_s + \partial_y f(\tilde{x}, t)}{(\gamma + 1)V_s + \partial_y f(\tilde{x}, t)} \Big|_{\tilde{x}=1}. \quad (19)$$

Уравнение непрерывности (17) нелинейно и в общем случае должно решаться численно, однако в режиме слабых сигналов оно может быть решено аналитически.

Режим слабых сигналов — это режим, при котором амплитуды зависящих от времени сигналов малы по сравнению с их постоянными частями. В этом случае в уравнении непрерывности (17) можно ограничиться линейными членами разложения по степеням функции f :

$$\frac{\partial f(\bar{x}, t)}{\partial t} = 2\gamma \frac{v_s}{L} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left[\frac{\sqrt{\bar{x}}}{\sqrt{\bar{x}} + \gamma} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} (\sqrt{\bar{x}} f(\bar{x}, t)) \right]. \quad (20)$$

Линейные уравнения допускают разделение переменных x, t . В случае синусоидальных сигналов частоты ω удобно пользоваться комплексными амплитудами $u(t) = u e^{i\omega t}$; $f(x, t) = f(x) e^{i\omega t}$, (21) подразумевая, что измеряемые напряжения и токи представляют собой вещественную часть комплексных функций. Заменой переменной

$$z = e^{i\pi/6} \alpha^{1/3} (\sqrt{\bar{x}} + \gamma), \quad (22)$$

где $f = 2L\omega / (\gamma v_s)$, уравнение (21) для синусоидальных потенциалов (22) сводится к виду

$$\frac{d}{dz} \left(\frac{1}{z} \frac{d}{dz} (\sqrt{\bar{x}} f) \right) = \sqrt{\bar{x}} f. \quad (23)$$

Общее решение этого уравнения можно записать в виде

$$f(\bar{x}) = \frac{1}{\sqrt{\bar{x}}} \left\{ C_1 \text{Ai}' \left[e^{i\pi/6} \alpha^{1/3} (\sqrt{\bar{x}} + \gamma) \right] + C_2 \text{Bi}' \left[e^{i\pi/6} \alpha^{1/3} (\sqrt{\bar{x}} + \gamma) \right] \right\}, \quad (24)$$

где $\text{Ai}'(z)$, $\text{Bi}'(z)$ — производные функций Эйри $\text{Ai}(z)$, $\text{Bi}(z)$.

Решение, удовлетворяющее граничному условию со стороны истока $f(\bar{x} = 1, t) = u(t)$, имеет вид

$$f(\bar{x}) = \frac{u}{\sqrt{\bar{x}}} \frac{\text{Bi}'(z_0) \text{Ai}'(F) - \text{Ai}'(z_0) \text{Bi}'(F)}{\text{Bi}'(z_0) \text{Ai}'(z_1) - \text{Ai}'(z_0) \text{Bi}'(z_1)}, \quad (25)$$

где $F = e^{i\pi/6} \alpha^{1/3} (\sqrt{\bar{x}} + \gamma)$ и введены следующие обозначения для переменной z на границах затвора:

$$z_0 = e^{i\pi/6} \alpha^{1/3} \gamma; \quad z_1 = e^{i\pi/6} \alpha^{1/3} (1 + \gamma). \quad (26)$$

Решение (25) конечно на конце затвора со стороны стока ($\bar{x} = 0$).

Воспользовавшись свойством функций Эйри

$$\text{Bi}'(z) \text{Ai}(z) - \text{Ai}'(z) \text{Bi}(z) = 1/\pi \quad (27)$$

и граничными условиями (18), (19), можно получить амплитуды токов стока и затвора. Амплитуды токов запишем в виде матрицы Y -параметров проводимости транзистора:

$$\begin{aligned} -i_g &= Y_{11} v_{gs} + Y_{12} v_{ds}; \\ i_d &= Y_{21} v_{gs} + Y_{22} v_{ds}, \end{aligned} \quad (28)$$

где i_g — ток, входящий в затвор;

i_d — ток, выходящий из стока;

v_{gs} , v_{ds} — скорость носителей заряда на участках «исток—сток» и «затвор—сток».

В режиме насыщения токи не зависят от напряжения стока, поэтому $Y_{12} = Y_{22} = 0$. Ненулевые компоненты матрицы проводимостей имеют вид

$$\begin{aligned} Y_{11} &= C_i W v_s \gamma e^{i\pi/3} \alpha^{2/3} \times \\ &\times \frac{\text{Bi}'(z_0) \text{Ai}(z_1) - \text{Ai}'(z_0) \text{Bi}(z_1) - \pi^{-1}}{\text{Bi}'(z_0) \text{Ai}'(z_1) - \text{Ai}'(z_0) \text{Bi}'(z_1)}; \\ Y_{21} &= C_i W v_s \gamma e^{i\pi/3} \alpha^{2/3} \times \\ &\times \frac{\pi^{-1}}{\text{Bi}'(z_0) \text{Ai}'(z_1) - \text{Ai}'(z_0) \text{Bi}'(z_1)}. \end{aligned} \quad (29)$$

Эти параметры позволяют рассчитать коэффициент усиления транзистора по току H_{21} в режиме короткого замыкания на выходе, который не зависит от сопротивлений участков «исток—затвор» и «затвор—сток» и удельной емкости затвора C_i :

$$H_{21} = \frac{Y_{21}}{Y_{11}} = \frac{1}{\pi [\text{Bi}'(z_0) \text{Ai}(z_1) - \text{Ai}'(z_0) \text{Bi}(z_1)] - 1}. \quad (30)$$

Нами была рассчитана частотная зависимость коэффициента H_{21} . В расчетах полагали подвижность $\mu = 100 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, скорость насыщения дырок v_s равной 10^7 см/с . Полученные данные сравнивались с опубликованными в [7, 9].

На рис. 5 представлены малосигнальные параметры алмазного транзистора с длиной затвора $L = 0,1 \text{ мкм}$,

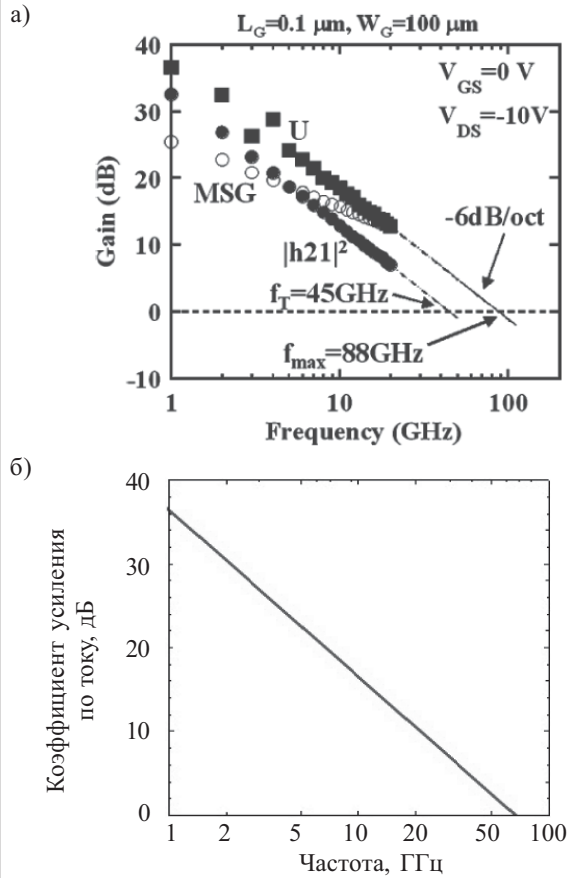


Рис. 5. Результаты измерения малосигнальных характеристик транзистора с длиной затвора 0,1 мкм [7] (а) и частотная зависимость коэффициента усиления по току, рассчитанная в настоящей работе при $U = 0,6 \text{ В}$ (б)

приведенные в [7]. Учитывая, что напряжение отсечки V_T в [9] составляет около 1 В, примем напряжение затвора от напряжения отсечки $U = -1$ В (с учетом противоположного знака $U = 1$ В). Учет участков «исток—затвор» и «затвор—сток» сводился к тому, что в наших расчетах согласно соотношению (30) все параметры рассчитывались по «внутреннему» напряжению затвора U' , связанного с «внешним» напряжением U . Отметим, что значения для «внутреннего» напряжения затвора U' находились из анализа эквивалентной схемы транзистора с учетом сопротивлений «исток—затвор» и «затвор—сток» (см. рис. 2). Как и ранее, при расчете сопротивления входного и выходного участков удельное сопротивление выбиралось равным 7 кОм. Рассчитанное «внутреннее» напряжение на затворе $U = 0,6$ В. Как видно из рис. 5, расчетная предельная частота усиления по току f_T при которой $|H_{21}|^2 = 1$, равна 66 ГГц, а различие с измеренным значением 45 ГГц можно объяснить отсутствием точных значений параметров образца, на котором производились измерения, а также возможными неучтенными паразитными эффектами.

В [9] приведены результаты измерения малосигнальных характеристик образца с $L = 0,2$ мкм, $W = 200$ мкм, $L_{SD} = L_{GD} = 0,5$ мкм, проведенные при

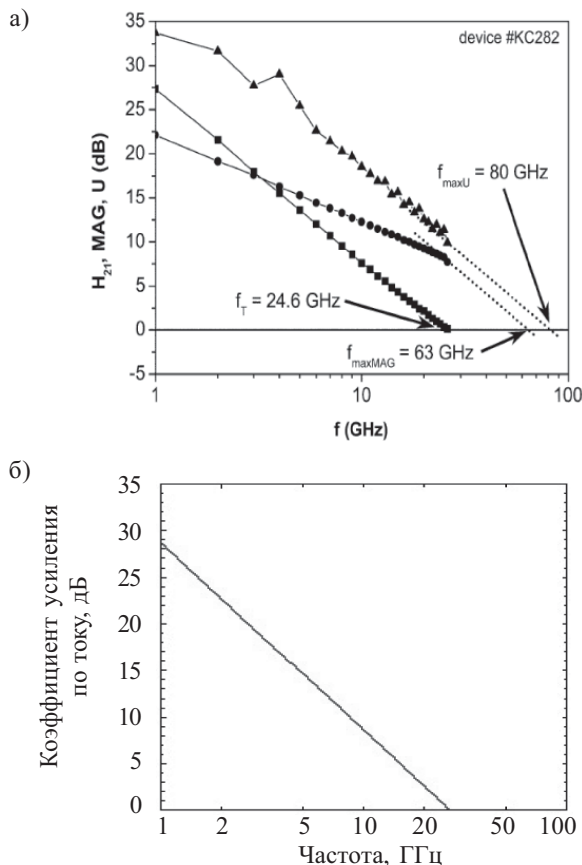


Рис. 6. Результаты измерения малосигнальных характеристик транзистора с длиной затвора 0,2 мкм [9] (а) и частотная зависимость коэффициента усиления по току, рассчитанная в настоящей работе по формуле (30) при $U' = 0,6$ В (б)

напряжениях смещения $V_{DS} = -20$ В и $V_{DS} = -0,3$ В. Если напряжение отсечки V_T принять равным 1 В, то для расчетов нужно брать (переходя к принятым здесь знакам) $U = 1,3$ В, что соответствует «внутреннему» напряжению на затворе $U = 0,8$ В. Как видно из рис. 6, при одинаковых значениях подвижности и скорости насыщения дырок расчет и эксперимент дают значение $f_T = 24,6$ ГГц. Отметим, что такое совпадение случайно, учитывая упомянутые выше неопределенности исходных параметров расчета.

В режиме усиления, т. е. при $|H_{21}| > 1$, коэффициент усиления по току с хорошей степенью точности описывается лидирующим членом разложения по частотам ω :

$$|H_{21}|^2 = \left[\frac{v_s}{\omega L} \frac{3\gamma}{1 + 3\gamma} \right]^2, \quad (31)$$

$$\text{где } \omega \ll \frac{\gamma v_s}{L}.$$

Отсюда получается максимальная частота усиления по току в режиме короткого замыкания

$$f_T = \frac{v_s}{2\pi L} \frac{3\gamma}{1 + 3\gamma}, \quad (32)$$

$$\text{где } \gamma = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 2 \frac{\mu U}{v_s L}} - 1 \right).$$

Отметим, что при малых напряжениях затвора $f_T \sim 1/L^2$, а именно:

$$f_T = \frac{3}{2} \frac{\mu U}{2\pi L^2},$$

$$\text{где } U \ll \frac{\gamma v_s}{L}.$$

Результаты расчета максимальной частоты усиления по току для транзистора с длиной затвора 1 мкм как функции «внутреннего» напряжения затвора (без учета участков «исток—затвор» и «затвор—сток») приведены на рис. 7.

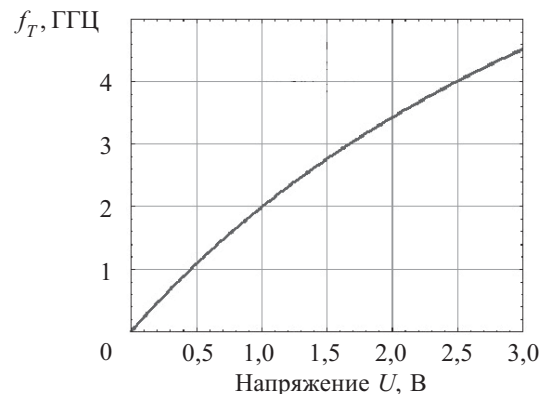


Рис. 7. Зависимость максимальной частоты усиления по току на выходе транзистора от напряжения на затворе в режиме короткого замыкания, рассчитанная по формуле (32) при длине затвора 1 мкм

Расчет максимальной мощности транзистора

Приведем пример расчета режима работы транзистора в классе А с наибольшей выходной мощностью в высокочастотном диапазоне.

Рассмотрим схему, в которой полевой транзистор подключен к нагрузке с сопротивлением R_L . Генератор входного сигнала имеет сопротивление R_G . В классе А смещение напряжения затвора изменяется от напряжения отсечки V_T до максимального напряжения $V_{GS\max}$, ограниченного напряжением пробоя затвора. Если пренебречь нелинейными эффектами, то можно считать, что ток и напряжение в выходной цепи изменяются по синусоидальному закону. Если пренебречь нелинейными эффектами и сдвигом фаз между выходным напряжением и током, то выходная мощность высокочастотного сигнала в классе А равна

$$P_{RF\ out} = I_{DS\ max}(V_0 - V_{DS\ min})/8. \quad (34)$$

Проведем расчет характеристик полевого транзистора с затвором Шоттки на гидрированном алмазе с длиной затвора 1 мкм, промежутками «исток—затвор» и «затвор—сток» 1 мкм, шириной затвора 500 мкм. Согласно [3], напряжение отсечки у таких транзисторов составляет около 1 В, пробой наступает при напряжении затвора $V_{GS} = -7$ В. Так как эксплуатация транзистора в режиме, близком к пробую, приводит к преждевременной деградации транзистора, выберем диапазон изменения напряжения затвора V_{GS} от +1 до -3 В, или $U = 0...4$ В. При этом, согласно расчетам, максимальная плотность тока равна $I_{DS\ max}/W = 140$ мА/мм, или $I_{DS\ max} = 70$ мА. Минимальное напряжение стока, при котором транзистор работает в режиме насыщения, равно $V_{DS\ min} = 6$ В. Максимальное напряжение питания V_0 ограничивается напряжением пробоя по стоку. В [3] напряжение пробоя по стоку составило $V_{GS} = -100$ В для образца с длиной затвора 2 мкм (данные о длине промежутков «исток—затвор» и «затвор—сток» образца отсутствуют). В [6] сообщается об изготовлении транзистора, работающего при напряжении стока 50 В в режиме больших сигналов с напряжением пробоя 70—80 В по стоку. Длина затвора транзистора составила 0,4 мкм, зазоры, предположительно, 0,5 мкм. Тогда будем считать, что напряжение пробоя по стоку транзистора с выше описанными исходными параметрами составляет не менее 100 В, что соответствует напряженности пробоя по поверхности 1 МВ/см. Поэтому примем рабочее напряжение питания V_0 для данного транзистора равным 50 В, подразумевая двукратный запас по пробую на стоке.

Таким образом, согласно (34), максимальная выходная мощность в высокочастотном диапазоне полевого транзистора на гидрированной поверхности алмаза с указанными выше параметрами при работе в классе А составит $P_{RF\ max} = 0,4$ Вт. Такая мощность достигается при сопротивлении нагрузки

$$R_L = (V_0 - V_{DS\ min}) / I_{DS\ max} \approx 600 \text{ Ом}.$$

Заключение

Результаты настоящей работы достаточно убедительно показывают, что в рамках модели плавного затвора можно рассчитать характеристики полевого СВЧ-транзистора на основе алмазной структуры с δ -легированным (водородом или бором) слоем, используя ее электрофизические параметры и геометрические размеры элементов транзистора. Рассчитанные основные параметры модельного СВЧ-транзистора достаточно близки к опубликованным экспериментальным результатам измерений реальных СВЧ-транзисторов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Алтухов А. А., Бугаев А. С., Гуляев Ю. В. и др. Перспективы создания СВЧ-элементов на основе полупроводниковых алмазных материалов // Успехи современной радиоэлектроники.— 2011.— №6.— С. 3—18. [Altukhov A. A., Bugaev A. S., Gulyaev Yu. V. i dr. // Uspekhi sovremennoi radioelektroniki. 2011. N 6. P. 3]
2. Landstrass M.I., Ravi K.V. Resistivity of chemical vapor deposited diamond films // Applied Physics Letters. — 1989.— T. 55.— С. 975—977.
3. Kasu M., K Ueda., Yamauchi Y. et al. Diamond-based RF power transistors: fundamentals and applications // Diamond and Related Materials.— 2007.— T.16.— С.1010—1015.
4. Kubovic M., Kasu M., Yamauchi Y., et al. Structural and electrical properties of H-terminated diamond field-effect transistor // Diamond and Related Materials.— 2009.— T.18.— С.796—799.
5. Ueda K., Kasu M., Yamauchi Y. et al. Characterization of high-quality polycrystalline diamond and its high FET performance // Diamond and Related Materials.— 2006.— T.15.— С.1954—1957.
6. Kasu M., Ueda K., Ye H. et al. High RF output power for H-terminated diamond FETs // Diamond and Related Materials.— 2006.— T.15.— С.783—786.
7. Ueda K., Kasu M., Yamauchi Y. et al. Diamond FET Using High-Quality Polycrystalline Diamond With f_T of 45 GHz and f_{max} of 120 GHz // IEEE Electron Device Letters.— 2006.— T.27.— С.570—572.
8. M. Kasu, K. Ueda, Y. Yamauchi, T. Makimoto. Gate capacitance-voltage characteristics of submicron-long-gate diamond field-effect transistors with hydrogen surface termination // Applied Physics Letters.— 2007.— T.90.— B. 43509.— С. 1—3.
9. Kubovic M., Kasu M., Kallfass I. et al. Microwave performance evaluation of diamond surface channel FETs // Diamond and Related Materials.— 2004.— T.13.— С.802—897.

В. А. КОВАЛЬЧУК, В. В. СЕВАСТЬЯНОВ

УДК 621.397.13

Украина, г. Винница, НИИ «Гелий»
E-mail: helium@svitonline.com

Дата поступления в редакцию
01.07 2011 г.

ГИБРИДНАЯ ИНТЕГРАЛЬНАЯ СХЕМА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЗВУКОВОГО СИГНАЛА

Разработана гибридная интегральная схема с номинальным напряжением питания 1,4 В, током потребления 0,7 мА и габаритными размерами 8×4×3 мм для обработки звукового сигнала в автономной аппаратуре.

В аналоговой микроэлектронной аппаратуре гибридные интегральные схемы (ГИС) имеют более широкие схемотехнические возможности по сравнению с полупроводниковыми интегральными микросхемами (ИМС) благодаря использованию различных навесных компонентов — чипов (ИМС, конденсаторов, резисторов) [1]. ГИС позволяют реализовать широкий класс функциональных микроэлектронных схем, являясь при этом экономически целесообразными в условиях серийного и даже мелкосерийного производства.

Гибридные интегральные схемы представляют собой широко распространенный, постоянно совершенствующийся, развивающийся конструктивно-технологический вариант исполнения изделий микроэлектроники.

Разработанная ГИС предназначена для использования во внутриканальных слуховых аппаратах, а также в аппаратуре специального назначения при работе от одного элемента питания типа PR48, поэтому особую важность приобретают габаритные размеры и потребляемый ток. Они должны быть минимальны.

Аналогами такой ГИС являются цифровые гибридные схемы GA3211, GA3226 компании Gennum Corporation (Канада), которая специализируется на разработке и изготовлении микросхем для аудио- и видеотехники и слуховых аппаратов. ГИС имеют ток потребления не менее 1,8 мА, габаритные размеры 11,2×6,2×3,4 мм. Корпуса этих схем и технология их изготовления запатентованы, а для изготовления требуется специальное нестандартное оборудование, поэтому стоимость микросхем высока. Кроме того, для установки на плату требуется оборудование для поверхностного монтажа, т. к. микросхемы имеют шариковые выводы.

Работа выполнена при поддержке Агентства Госсобственности Украины в рамках Госзаказа на научно-технологическую продукцию (договор № 93182/19).

Разработанная ГИС для многофункциональной обработки звукового сигнала с номинальным напряжением питания 1,4 В, током потребления 0,7 мА и габаритными размерами 8×4×3 мм соответствует ГОСТ 18725 «Микросхемы интегральные. Общие технические условия».

ГИС осуществляет многоканальную полную обработку сигнала за счет того, что в ней собран ряд независимых функциональных узлов (как цифровых, так и аналоговых). В микросхеме используются базовые кристаллы, в основном, собственной разработки и изготовления, а именно — операционные усилители, выполненные по КМОП-технологии. Структурная схема ГИС приведена на рис. 1.

Для преобразования сигнала в цифровую форму и обратно в ГИС используются аналого-цифровые (АЦП) и цифроаналоговые (ЦАП) преобразователи, в которых применяются принципы сигма-дельта-модуляции. Эти функциональные узлы выполнены также на базе кристаллов. Преобразователи на основе сигма-дельта-модуляции благодаря высокой скорости обработки сигнала способны обеспечить высокую разрешающую способность преобразования даже при одноразрядном квантовании и, что немаловажно, не критичны к точности выполнения элементов схемотехники. Кроме того, применение таких преобразователей резко снижает требования к сопутствующим им аналоговым фильтрам, а необходимость в таких прецизионных элементах, как устройство выборки-хранения информации, отпадает совсем, что дает возможность выполнить АЦП в виде интегральной схемы (кристалла).

Способ формирования многократных отсчетов на выходе — сигма-дельта-модулятора зависит от

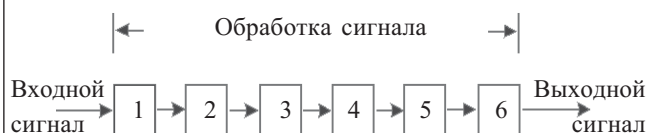


Рис. 1. Структурная схема ГИС для обработки звуковых сигналов:

1 — аналогово-цифровой преобразователь; 2 — предварительный усилитель; 3 — сигнальный процессор; 4 — сумматор; 5 — цифроаналоговый преобразователь; 6 — выходной каскад

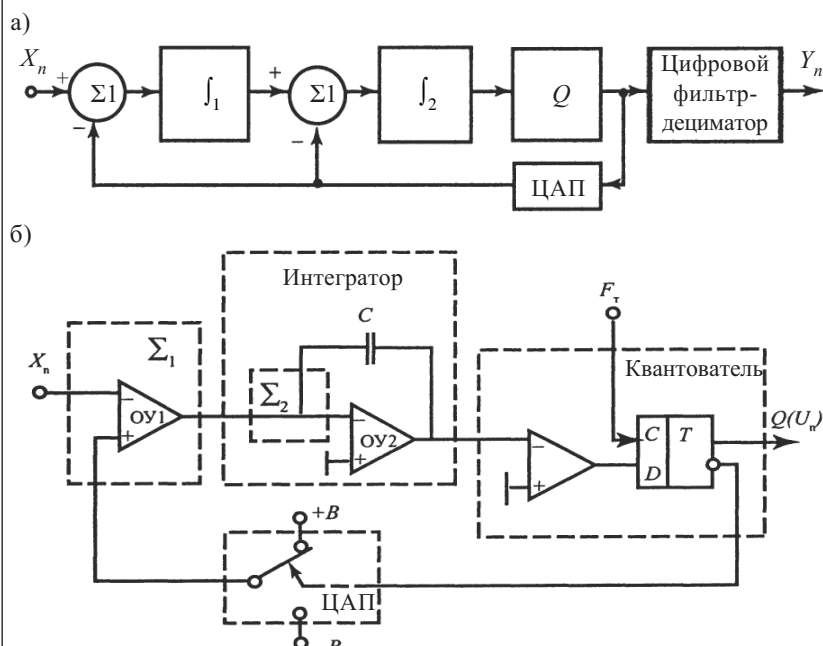


Рис. 2. Структурная (а) и функциональная (б) схема АЦП с сигма-дельта-модулятором второго порядка

того, какова требуемая разрядность этих отсчетов и с какой скоростью они должны следовать. Повышение разрядности и скорости следования отсчетов (частоты дискретизации F) усложняет задачу и ограничивает выбор средств, с помощью которых эта задача может быть решена.

Одним из способов получения многоразрядного сигнала с высоким разрешением является использование сигма-дельта-модулятора 2-го порядка совместно с цифровым децимирующим фильтром высокого порядка. Структурная и функциональная схемы такого АЦП показаны на рис. 2.

Схема состоит из двух контуров сигма-дельта-модулятора, включенных последовательно, т. е. сигнал с выхода первого интегратора является входным сигналом для второго интегратора, а на вычитающие входы обоих сумматоров $\Sigma 1$ и $\Sigma 2$ подается один и тот же сигнал с выхода ЦАП [2, 3].

Далее цифровой сигнал поступает на сигнальный процессор — микропроцессор, решающий задачи, которые ранее традиционно решали с помощью аналоговой схемотехники [4, 5]. К сигнальным процессорам предъявляются специфические требования: максимальное быстродействие, малые габариты, легкая стыковка с аналого-цифровыми и цифроаналоговыми преобразователями, большая разрядность обрабатываемых данных и небольшой набор математических операций, обязательно включающий операцию умножения-накопления, и аппаратную организацию циклов. Сигнал в каждой полосе частот обрабатывается независимым каналом процессора. Усиление в любой полосе является либо функцией энергии, определенной в этой полосе, либо функцией полной выявленной многоканальной энергии. Сигнальный процессор осуществляет контроль и автоматическую регулировку усиления (АРУ) в каждом канале (ограничивает сигнал на требуемом уровне с заданным ко-

эффициентом компрессии, регулирует постоянную времени атаки и выключения АРУ). В каждом канале имеются фильтры с тремя программируемыми параметрами: f — частота полюса (центральная частота), K — коэффициент передачи, Q — добротность. Сигналы из каждой полосы частот после обработки складываются сумматором в один сигнал, который поступает на цифроаналоговый преобразователь.

В разработанной ГИС использована схема сигма-дельта-ЦАП третьего порядка, структурная схема которого приведена на рис. 3.

Выходной каскад ГИС построен на двух операционных усилителях (ОУ), включенных по схемам инвертирования сигнала (первый) и не инвертирования сигнала (второй). Нагрузка включена между выходами первого и второго усилителей (рис. 4) В режиме покоя потенциал на выходах ОУ одинаковый, поэтому напряжение

между выводами нагрузки равно нулю. В этом случае ток в нагрузке определяется только током потребления функциональных узлов, входящих в состав ГИС, и практически равен нулю, т. к. все узлы выполнены по КМОП-технологии и имеют очень малый ток потребления. При подаче сигнала выходные напряжения на выходах ОУ будут противоположными по знаку и разность их значений в идеальном случае равна напряжению питания. Поэтому ток в нагрузке будет максимальным.

Большой опыт разработки и производства мощных полевых транзисторов в НИИ «Гелий» позволил выполнить выходной каскад ОУ на мощных транзисторах, способных отдавать большой ток в нагрузку, а следовательно, в аппаратуру. Это позволяет использовать ГИС в звукозаписывающей и звуковоспроизводящей аппаратуре.

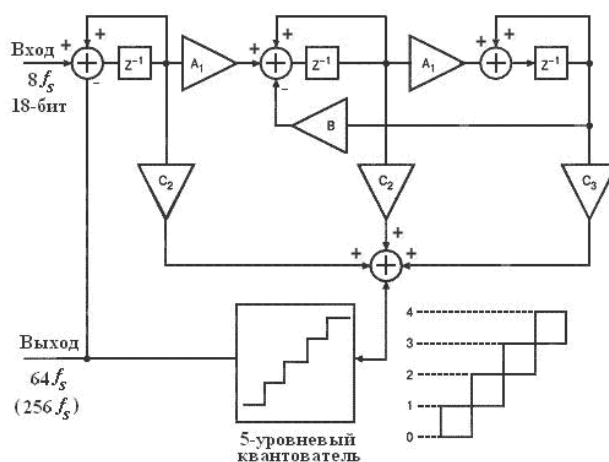


Рис. 3. Структурная схема сигма-дельта-модулятора третьего порядка

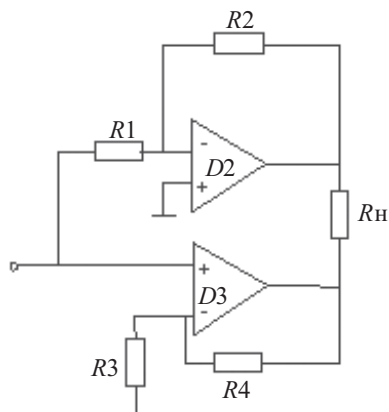


Рис. 4. Выходной каскад ГИС

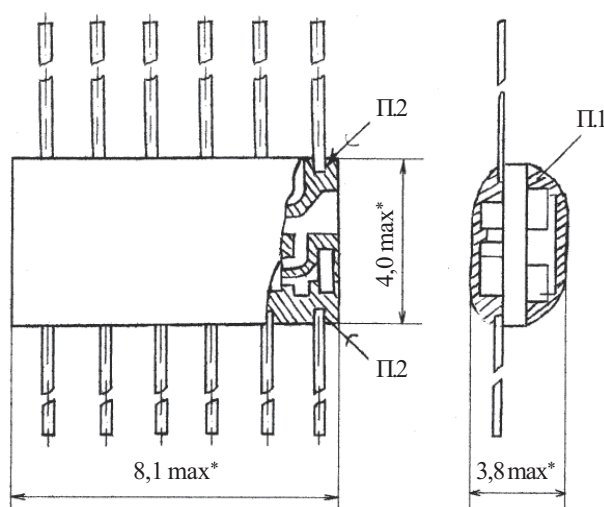


Рис. 5. Сборочный чертеж ГИС

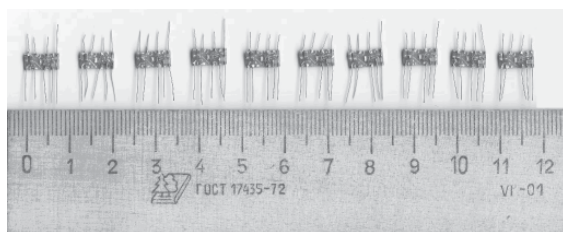


Рис. 6. Внешний вид ГИС из опытной партии

Конструктивно ГИС представляет собой плату размером 4×8 мм, на которой с обеих сторон размещены пассивные и активные элементы. По периметру платы размещены выводы схемы (рис. 5). ГИС герметизируется компаундом, который наносят на поверхность платы так, чтобы покрыть навесные элементы. Вязкость компаунда подбирается такой, чтобы он удерживался на поверхности платы за счет сил поверхностного натяжения. Полимеризация компаунда осуществляется в два этапа — при нормальной температуре (25±5°С) и при температуре 70°С. Пассивными элементами микросхемы служат чип-конденсаторы типоразмера 0603 и чип-резисторы типоразмера 0402, активными элементами — чип-кристаллы.

Такая конструкция микросхемы позволяет минимизировать ее размеры, не требует дорогостоящей оснастки для изготовления корпуса и герметизации микросхемы, что существенно снижает ее стоимость по сравнению с аналогами. Была изготовлена опытная партия ГИС для обработки звуковых сигналов (рис. 6).

Основные электрические параметры ГИС:

Напряжение питания	0,95—1,50 В
Максимальный ток потребления	0,7 мА
Общее усиление	82 дБ
Границы частотной характеристики	100—16000 Гц
Коэффициент гармоник	1%
Входной динамический диапазон	95 дБ
Эквалайзер фильтр, диапазон регулировки:	
— центральная частота	125—16000 Гц
— глубина (усиление)	–30...30 дБ
— добротность	0,707—70,7
Диапазон регулировки частот	–18...42 дБ
Параметры автоматической регулировки усиления:	
— время атаки	0,25 мс
— время выключения	5000 мс
Диапазон регулировки коэффициента компрессии	от 1:1 до ∞:1

Разработанная ГИС может с успехом использоваться в звукозаписывающей и звуковоспроизводящей аппаратуре, внутриканальных слуховых аппаратах, компьютерах, радиоаппаратуре и др., которые питаются от автономных источников.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Микроэлектроника: Кн. 4. Гибридные интегральные микросхемы / Под ред. Л. А. Коледова. — [Mikroelektronika / Pod red. L. A. Koledova]
2. Голуб В. С. Цифровая обработка сигналов сигма-дельта АЦП // Электроника: НТБ. — 2001. — № 4. — С. 22—26 [Golub V. S. // Elektronika NTB. 2001. N 4. P. 22]
3. Голуб В. С. Сигма-дельта модуляторы и АЦП // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2003. — № 4. — С. 35—41. [Golub V. S. // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature. 2003. N 4. P. 35]
4. Волович Г. Сигма-дельта ЦАП // Компоненты и технологии. — 2002. — № 5. — С. 56—58 [Volovich G. // Komponenty i tehnologii. 2002. N 5. P. 56]
5. Солонина А., Улахович Д., Яковлев Л. Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов. — С-Пб.: БХВ-Петербург, 2002. [Solonina A., Ulakhovich D., Yakovlev L. S-Pb. BKhV-Peterburg. 2002]
6. Пат. України 65140. Пристрій для обробки звукового сигналу виконаний в інтегральній мікросхемі / В. А. Ковальчук, В. В. Севаст'янов. — 2011. — Бюл. № 22. [Pat. of Ukraine. 65140 / V. A. Koval'chuk, V. V. Sevast'yanov. 2011. Bull. N 22.]

К. т. н. Г. Ю. ЩЕРБАКОВА, А. А. ДИЛЕВСКИЙ, д. т. н. В. Н. КРЫЛОВ,
к. т. н. О. В. ЛОГВИНОВ, к. т. н. О. Е. ПЛАЧИНДА

УДК 621.382

Украина, Одесский национальный политехнический университет
E-mail: Galina_onpu@mail.ru

Дата поступления в редакцию
25.06 2011 г.

ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ БИНАРИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ФОТОШАБЛОНОВ В ПРОСТРАНСТВЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Предложен метод, основанный на применении субградиентного итеративного метода оптимизации в пространстве вейвлет-преобразования, который удовлетворяет требованиям задачи автоматизированного оптического контроля фотошаблонов по погрешности и помехоустойчивости.

Для современного производства электронной аппаратуры характерно использование автоматизированных систем обработки изображений (АСОИ) при контроле печатных плат и интегральных микросхем, которые изготавливаются с использованием фотошаблонов (ФШ). В таких системах проводится выделение и анализ дефектов контролируемого изделия при сравнении его изображения с эталонным. Чтобы обеспечить возможность сравнения, должно быть проведено позиционирование или ориентация изображения контролируемого ФШ: определение и коррекция угла наклона, сдвигов и изменения масштаба относительно эталона. В [1] на основе локализации реперных знаков разработан метод, позволяющий производить позиционирование с достаточной для автоматизированного оптического контроля погрешностью, когда отношение сигнал/помеха больше чем 7 (по мощности). Для того чтобы произвести сравнение ФШ с эталоном, необходимо бинаризовать его изображение, что обеспечивает инвариантность к трансформации интенсивности и существенно сокращает объем обрабатываемой видеоинформации.

Бинаризация изображения традиционно может быть реализована одним из двух методов. Первый метод использует пространственную обработку и в условиях неравномерной освещенности отличается высокой погрешностью. Поэтому в АСОИ используется, как правило, второй — метод пороговой обработки [2], при котором на основе анализа гистограммы интенсивностей пикселей изображения отыскивается порог бинаризации T . Бинаризация при пороговой обработке — это операция преобразования полутонового изображения (интенсивность пикселей которого изменяется в диапазоне от 1 до 256) в двоичное изображение по порогу интенсивности (порогу бинаризации). При бинаризации должно быть принято решение, что именно наблюдается в пикселе — изобра-

жение дорожки либо подложки (полезный сигнал либо фон). Далее пикселу присваивается значение «0» либо «1» соответственно:

$$B(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{если } A(x, y) > T; \\ 0, & \text{если } A(x, y) \leq T, \end{cases} \quad (1)$$

где $A(x, y)$, $B(x, y)$ — интенсивность пикселей исходного полутонового и результирующего бинаризованного изображений ФШ соответственно.

Влияние основного недостатка этого метода — низкой помехоустойчивости — снижают посредством сглаживания гистограммы интенсивности пикселей изображения методами низкочастотной фильтрации, медианной фильтрации, оконной обработки [3]. Однако при этом повышается погрешность определения порога бинаризации T , которая в рассматриваемой задаче не должна превышать 50% от ширины дорожки.

Количество мод на гистограмме зависит от степени зашумленности изображения. При этом, как правило, интенсивности пикселей изображения дорожек и подложки ФШ сосредоточены вблизи двух преобладающих мод. Автоматизированный поиск T в АСОИ проводится обычно с помощью итеративных методов гладкой оптимизации нулевого и первого порядков. В качестве начального приближения в этих методах выбирают полусумму максимального и минимального значений интенсивности, т. е. средний уровень интенсивности [2, с. 857]. Общим достоинством таких методов является высокая точность. К недостаткам относится низкая помехоустойчивость, а также то, что отыскивается не глобальный, а ближайший к начальной точке поиска локальный оптимум. Поэтому флуктуационные помехи на изображении затрудняют автоматизацию поиска порога бинаризации и обуславливают необходимость применения в АСОИ дорогостоящих осветительно-фокусирующих устройств.

Для снижения влияния указанных недостатков при решении задачи анализа гистограмм можно использовать субградиентный итеративный метод оптимизации в пространстве вейвлет-преобразования (ВП), который отличается повышенной помехоустойчивостью и пониженной погрешностью [4]. Для этого необходимо разработать на его основе субградиентный итеративный метод бинаризации.

Целью настоящей работы является создание базовой информационной технологии анализа гистограмм и на ее основе — метода бинаризации изображений ФШ интегральных схем и печатных плат, обеспечивающего допустимую для задачи бинаризации погрешность при отношении сигнал/помеха больше чем 7 (по мощности).

Разработанная технология анализа гистограмм включает в себя несколько основных этапов.

На первом этапе строится гистограмма интенсивности пикселей изображения ФШ (рис. 1, а). На втором этапе определяются две основные моды (максимумы) гистограммы. Точку старта поиска для каждой из мод выбирают как $L+1$ и $255-L$ соответственно. Здесь L — длина носителя вейвлет-функции (ВФ), которая определяется требуемой помехоустойчивостью и точностью с учетом того, что максимальный диапазон изменения интенсивности $x=1 \dots 256$.

Поиск максимумов гистограммы осуществляется с помощью субградиентного итеративного метода оптимизации в пространстве ВП [4], который определяется следующей итерационной схемой:

$$c[n] = c[n-1] - \gamma[n] \times \sum_{m=1}^L \alpha_m[n] \tilde{\nabla}_{c^+} Q(x[n], c[n-1], a[n-m]), \quad (2)$$

где $c[n-1]$ — координата максимума;
 $\gamma[n]$ — величина шага n -й итерации;
 $Q(x[n], c[n-1], a[n-m])$ — значения интенсивности пикселей на гистограмме;
 $a[n-1]$ — скаляр

Здесь $\alpha_m[n]$, $m=1, \dots, L$ — компоненты вектора, полученного в результате дискретизации ВФ. Эта функция получена путем снятия ограничений на вид ВФ в итерационной схеме алгоритма регулярного итерационного поиска в пространстве ВП.

В качестве базового метода для оптимизации использован градиентный метод [5]. Исходными данными для него служат: начальное значение координаты максимума; начальное значение шага $\gamma=1$; коэффициент β , обуславливающий изменение шага γ вблизи максимума, $\beta=0,5$; точность ϵ определения оценки субградиента.

Процедура вычисления максимума предполагает следующее:

- вычисление оценки субградиента и сравнение с заданным значением;
- если вычисленное значение оценки субградиента меньше заданного ϵ , процедуру прекращают;
- вычисление величины шага, для чего задается начальное значение величины шага $\gamma = 1$ и вычисляется вспомогательное значение приращения функции Δ ; если приращение меньше нуля, то принимают значение $\gamma[n] = \gamma$ и переходят к следующему этапу, иначе — $\gamma[n] = \beta\gamma$ и возвращаются к предыдущему этапу;
- расчет координаты максимума на n -й итерации;
- присвоение номеру итерации следующего значения ($n = n+1$) и переход к начальному этапу вычисления максимума.

При вычислении оценки субградиента на каждой итерации на первом этапе вычисляется свертка значений функционала $Q(x[n], c[n-1])$ с ВФ Хаара. Это позволяет переместить поиск в район экстремума с погрешностью, определяемой асимметрией этого функционала. С целью снижения этой погрешности на втором этапе оценки субградиента при поиске максимумов гистограммы при бинаризации вычисляется взвешенная сумма HWT значений гистограммы $Q(x[n], c[n-1])$ с гиперболической функцией $\Psi(j)=1/(\alpha x)$ при начальном масштабе $\alpha=0,5$:

$$HWT(c[n]) = Q(x[n], c[n-1]) * \Psi(j), \quad (3)$$

где $*$ — операция взвешенного суммирования;
 $j = 1, L$.

Далее, после определения оценки субградиента, определяют приближение к значению координаты одной из двух мод гистограммы, используя итеративный алгоритм в пространстве ВП по схеме

$$c_i[n+1] = c_i[n] + \gamma[n+1] WT(c_i[n]). \quad (4)$$

Здесь $WT(c_i[n])$ — значение взвешенной суммы с ВФ для $c_i[n]$, $i = 1, \dots, M$, где M — количество мод (при бинаризации $M = 2$).

Если найденная на этом этапе координата экстремума (моды) отличается от координаты экстремума предыдущего этапа не более чем на δ (заданную точ-

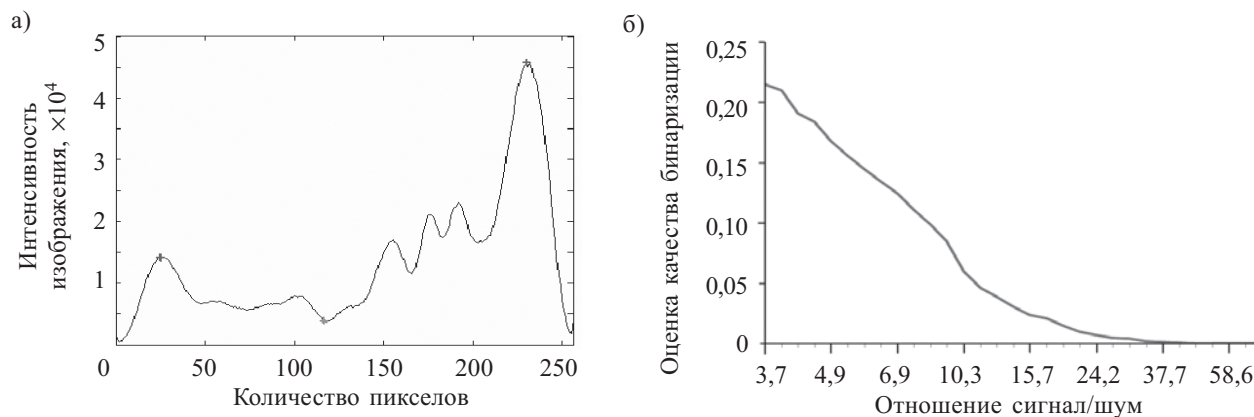


Рис. 1. Гистограмма интенсивности пикселей изображения ФШ (а) и график зависимости качества бинаризации от отношения сигнал/шум (по мощности) (б)

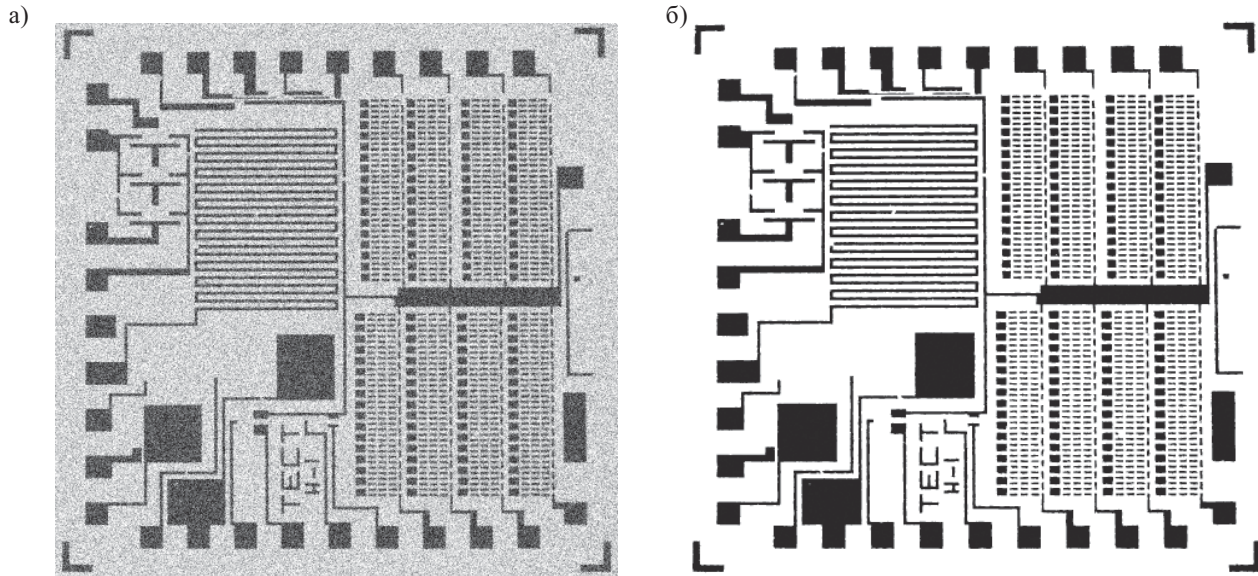


Рис. 2. Изображение ФШ при отношении сигнал/шум, равном 7, (а) и бинаризованное изображение ФШ (б)

ность поиска координаты оптимума), процесс поиска заканчивается.

На втором этапе поиска моды для оценки субградиента использовано гиперболическое вейвлет-преобразование, полученное по лифтинговой схеме [6]. На каждом уровне поиска координаты оптимума значение масштаба α увеличивается в соответствии с последовательностью $\alpha = \{0, 5; 1; 2; 3; 4; 5\}$. Если условие окончания поиска координаты оптимума при значении $\alpha = 5$ не достигается, оценка субградиента производится разностным методом. После этого поиск заканчивается. В процессе поиска координаты экстремума осуществляется последовательный переход (с ростом α) от поиска с помощью вейвлета Хара, способного обеспечить высокую помехоустойчивость, вплоть до поиска с помощью дифференциатора, способного дать максимальную точность. Далее проверяют вышеописанное условие точности определения значения моды, и если оно достигнуто, процесс останавливают.

Метод бинаризации, разработанный на основе этой технологии, предполагает после определения координат максимумов гистограммы определение их полусуммы. Это значение используется как стартовая точка для поиска порога бинаризации T . Далее с помощью описанного выше субградиентного итеративного метода оптимизации отыскивается T как пороговое значение минимума интенсивности.

Для разработанного метода было проведено исследование зависимости качества бинаризации от отношения сигнал/помеха. Исследовался черно-белый перепад, размер изображения составлял 256×256 пикселей. Качество бинаризации определялось как отношение количества ошибочно бинаризованных пикселей к общему количеству пикселей изображения черно-белого перепад. Отношение сигнал/помеха по мощности определялось как отношение квадрата разности интенсивности изображений объекта и фона к квадрату их среднего квадратичного отклонения.

В результате исследования (рис. 1, б) можно сделать вывод, что при отношении сигнал/помеха не менее чем 7 ошибка бинаризации не превышает 0,12. Это обеспечивает требуемую точность распознавания дорожек на ФШ: при ширине дорожки в 4 пикселя ошибочно может быть бинаризован только один пиксел дорожки, что меньше 50% от ширины дорожки, это значит, что в процессе бинаризации не будут создаваться условия для ошибочного контроля целостности дорожек (рваная дорожка не будет принята за целую и наоборот).

Для иллюстрации работы метода на рис. 2 приведены результаты обработки изображения ФШ с аддитивным шумом при отношении сигнал/помеха, равном 7, и результаты бинаризации этого изображения.

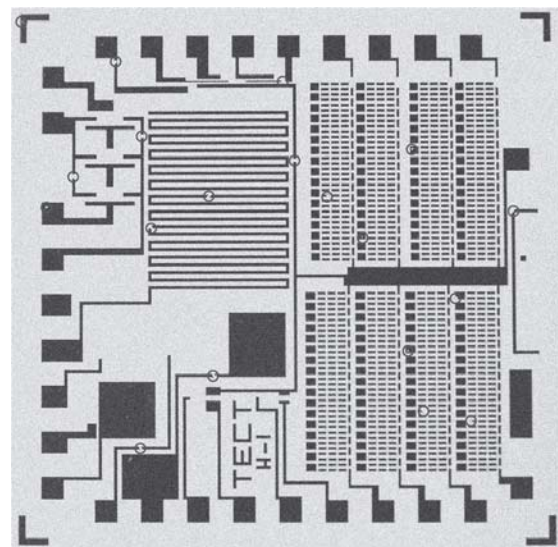


Рис. 3. Изображение фотошаблона с выявленными дефектами

Выявление дефектов на изображении исследуемого ФШ производится на основе его сравнения с эталонным. Так как пиксели бинаризованных изображений имеют значения «1» или «0», сравнение проводится на основе логической операции «исключающее или»:

$$\begin{aligned} C(x, y) &= A(x, y)B(x, y) \quad A(x, y)B(x, y) = \\ &= A(x, y) \oplus B(x, y). \end{aligned} \quad (5)$$

Чтобы исключить из рассмотрения ложные дефекты (результаты относительного сдвига на 1 пиксел изображений контролируемого ФШ и эталона), для обеспечения помехоустойчивости принятия решения о присутствии дефекта используется медианная фильтрация. Изменяя длину носителя медианного фильтра, можно выявлять дефекты с заданной точностью. На рис. 3 представлено изображение ФШ с выявленными дефектами, которые обведены кружочками.

Таким образом, приведенные данные показывают, что базовая информационная технология анализа гистограмм и разработанный на ее основе метод бинаризации изображений удовлетворяют требованиям задачи автоматизированного оптического контроля фотошаблонов и печатных плат по погрешности и помехоустойчивости (ошибка бинаризации не превышает 1 пиксела). Поэтому они могут быть рекомендованы для широкого круга задач, в которых используются пороговые методы бинаризации.

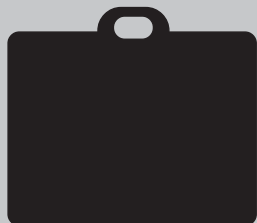
ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Крылов В. Н., Щербакова Г. Ю., Козина Ю. Ю., Волошин В. В. Помехоустойчивая классификация реперных знаков в пространстве гиперболического вейвлет-преобразования // Региональный міжвузівський збірник наукових праць «Системные технологии». — 2007. — № 6 (53). — С. 125—130. [1. Krylov V. N., Shcherbakova G. Yu., Kozina Yu. Yu. // Regional'nyi mizhvuziv's'kii zbirk naukovikh prats' «Sistemnye tekhnologii». 2007. N 6 (53). P. 125]
2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. — М.: Техносфера, 2005. [Gonsales R., Vuds R. Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii. M.: Tekhnosfera, 2005.]
3. Крылов В. Н., Щербакова Г. Ю., Козина Ю. Ю. Помехоустойчивая бинаризация изображений фотошаблонов в пространстве гиперболического вейвлет-преобразования // Труды Одесского политехн. ун-та. — 2007. — Вып. 2 (28). — С. 119—122. [Krylov V. N., Shcherbakova G. Yu., Kozina Yu. Yu. // Trudy Odesskogo politekhn. un-ta. 2007. Iss. 2 (28). P. 119]
4. Крылов В. Н., Щербакова Г. Ю. Иерархический субградиентный итеративный метод оптимизации в пространстве вейвлет-преобразования // Электроника и связь. — 2008. — № 6 (47). — С. 28—31. [Krylov V. N., Shcherbakova G. Yu. // Elektronika i svyaz'. 2008. N 6 (47). P. 28]
5. Полак Э. Численные методы оптимизации. Единый подход. — М.: Мир, 1976. [Polak E. M.: Mir, 1976.]
6. Krylov V. N., Polyakova M. V. Contour images segmentation in space of wavelet transform with the use of lifting // Optical-electronic informatively-power technologies. — 2007. — N 2 (12). — P. 48—58.

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

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

- Метод определения радиационной стойкости интегральных схем с помощью низкоэнергетичного рентгеновского излучения (Украина, г. Киев)
- Bonded Nd-Fe-B magnets — composite materials for various applications (Serbia, Belgrade)
- Природа переходов и механизмы генерации в лазерах с электронной накачкой на основе оптически однородных, радиационно легированных кристаллов CdS (Германия, г. Штутгарт)
- Реализация и исследование непрерывной и импульсной синхронизации работы генераторов Чуа (Украина, г. Черновцы)
- Фотолюминесцентный метод определения механизмов пластической деформации на границе раздела «оксид кремния — кремний» (Украина, г. Одесса)
- Проектирование цифровых фильтров с независимым управлением фазочастотной характеристикой (Россия, г. Тольятти)
- Многозондовое подключающее МЭМС устройство для контроля компонентов с матричными шариковыми выводами (Украина, г. Харьков, г. Львов)
- Исследование влияния толщины кремниевых пластин на характеристики многопереходных солнечных элементов с вертикальными p-n-переходами (Украина, г. Днепропетровск)



- Интенсивность теплоотдачи при кипении на поверхности малого размера (Украина, г. Киев)
- Полуактивный радиочастотный датчик контроля расхода электроэнергии (Украина, г. Винница)
- Адсорбционно-кинетическая модель осаждения пленок поликристаллического кремния, легированного кислородом в процессе роста (Республика Беларусь, г. Минск)
- Электромагнитные кристаллы на основе низкоимпедансных неоднородностей (Украина, г. Киев)

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

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

И. И. ПАВЛОВИЧ, к. х. н. З. Ф. ТОМАШИК,
 д. х. н. В. Н. ТОМАШИК, к. х. н. И. Б. СТРАТИЙЧУК

УДК 621.794.4 : 546.87'24

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников
 им. В. Е. Лашкарёва НАНУ
 E-mail: pavlovich.inga@mail.ru

Дата поступления в редакцию
 01.08 2011 г.

ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ХАЛЬКОГЕНИДОВ Bi и Sb В ТРАВИЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЯХ $K_2Cr_2O_7-HBr$

Разработаны полирующие травители и даны рекомендации по их применению для обработки полупроводниковых материалов, которые используются для изготовления рабочих элементов термоэлектрических приборов.

Полупроводниковые материалы Bi_2Te_3 и твердые растворы на их основе используют как материалы для *n*- и *p*-веток термоэлектрических преобразователей энергии, в том числе и электронных твердотельных охладителей, которые работают в интервале температур 200—350 К [1—5]. В настоящее время таким материалам нет альтернативы как по термоэффективности в указанном диапазоне температур, так и по масштабности их практического использования для производства термоэлектрических преобразователей энергии. При изготовлении приборов на основе полупроводниковых материалов проблема получения высококачественной поверхности на финишном этапе химической обработки остается одной из актуальных в современном полупроводниковом материаловедении. На практике для получения поверхности необходимого качества используют, как правило, химико-динамическое полирование (ХДП) в специально подобранных травильных растворах [6].

В [6] для травления теллурида висмута использовали раствор 1 ч HNO_3 + 1 ч HCl . Такой травитель подходит для выявления дислокаций, которые образуются при скалывании на плоскости (0001). В [7] для химического полирования Bi_2Te_3 используют горячий раствор разбавленной “царской водки”. Авторы [8] для химической обработки теллурида висмута использовали два раствора (2 ч HNO_3 + 1 ч HCl + 6 ч H_2O или 10 мл HNO_3 + 10 мл HCl + 40 мл H_2O + 1 г I_2). В результате травления в обоих случаях на поверхности образовывались гексагональные ямки. Авторы [9] для химической обработки кристаллов теллурида висмута использовали раствор 1 ч HNO_3 + 1 ч HCl + 2 ч $K_2S_2O_8$ (насыщ.). Такой травитель выявляет дислокации на Bi_2Te_3 , а также воздействует на кристаллы $Bi_{2-x}Sb_{2-2x}Te$.

Других публикаций о полирующих травителях для теллурида висмута и твердых растворов на его основе не обнаружено. При этом для указанных полупроводниковых материалов нет сведений об использовании бромвыделяющих полирующих травителей,

которые применяются для получения полированных поверхностей различных халькогенидов металлов, в частности теллуридов цинка, кадмия и ртути и твердых растворов на их основе. Поэтому целью настоящей работы является исследование закономерностей химического травления кристаллов Bi_2Te_3 и твердых растворов на их основе травильными композициями $K_2Cr_2O_7-HBr$, изучение концентрационных границ полирующих растворов, определение влияния процесса старения травильных смесей на скорость травления и качество полирования, оптимизация травильных композиций и режимов химической обработки для использования их в процессе изготовления рабочих элементов приборов.

Методика эксперимента

При исследовании использовали полупроводниковые материалы Bi_2Te_3 , $n-(Bi_2Te_3)_{0,9}(Sb_2Te_3)_{0,05}(Sb_2Se_3)_{0,05}$ и $p-(Bi_2Te_3)_{0,25}(Sb_2Te_3)_{0,72}(Sb_2Se_3)_{0,03}$, которые были выращены методом вертикальной зонной плавки из компонентов следующей степени чистоты Bi — ВИ-000, Te — ТВ-4, Sb — СУ-000, Se — ОСЧ 17-4. Для проведения эксперимента слитки разрезали на пластины размерами около 5×7×1,5 мм, которые последовательно шлифовали водными суспензиями абразивных порошков М10, М5 и М1 в порядке уменьшения размера зерна абразива. После этого образцы промывали теплой водой с добавлением поверхностно-активных веществ, большим количеством дистиллированной воды и просушивали на воздухе.

Механически полированная поверхность кристаллических образцов стабильна во времени, но структурно несовершенна, в связи с чем перед началом исследований с нее удаляли слой толщиной 80—100 мкм травителем того же состава, в котором в последующем проводили процесс химической обработки. Далее образцы приклеивали нерабочей стороной на стеклянные подложки с помощью пичеина и помещали в кассету, которая позволяла проводить процесс ХДП. Скорость травления образцов устанавливали по уменьшению их толщины, которую измеряли до и после травления с помощью многооборотного часового индикатора 1 МИГП с точностью ±0,5 мкм.

Для приготовления травильных смесей необходимого состава использовали 13%-й водный раствор $K_2Cr_2O_7$ (ч.д.а.) и 48%-ю бромистоводородную кислоту HBr (ос.ч.), причем указанные компоненты сме-

шивали в количествах, соответствующих их объемному соотношению в травильной композиции (т. е. состав травителя выражали в процентах от объема). Растворы формировали непосредственно перед использованием и выдерживали два часа для полного прохождения реакции между компонентами. После травления образцы промывали сначала 0,05 М раствором тиосульфата натрия, затем 15%-м раствором NaOH, несколько раз дистиллированной водой и высушивали на воздухе.

Экспериментальные исследования характера физико-химического взаимодействия халькогенидов висмута и сурьмы с целой серией травильных композиций позволили разработать следующую технологическую схему обработки пластин:

1. Резка слитка струной с алмазным напылением (размеры образцов 5×7×1,5 мм).

2. Промывка дистиллированной водой с добавлением ПАВ и финишная промывка дистиллированной и деионизированной водой (очистка поверхности от механических загрязнений, пыли и осколков материала).

3. Высушивание поверхности с помощью фильтровальной бумаги (получение сухой, чистой поверхности).

4. Шлифование водными суспензиями абразивных порошков M10, M5 и M1 в порядке уменьшения размера зерна абразива (уменьшение толщины нарушенного слоя и микронеровностей).

5. Механическое полирование алмазными пастами АСМ-3 и АСМ-1 (получение гладкой, полированной поверхности).

6. Обезжиривание органическими растворителями с постепенным увеличением полярности — чистый ацетон, C_2H_5OH (растворение и удаление остатков абразивных паст).

7. Удаление нарушенного слоя (около 100 мкм) химико-механическим полированием (ХМП) в разработанном травителе (6 об.% H_2O_2 + 7 об.% 4НВr + 20 об.% этиленгликоля).

8. Химико-динамическое полирование или ХДП + ХМП в разработанных и оптимизированных травителях (получение полированной поверхности с необходимой микроструктурой и шероховатостью).

9. Уменьшение толщины окисленного поверхностного слоя за счет поэтапной промывки пластин в растворах $Na_2S_2O_3$, NaOH и трижды в H_2O .

10. Высушивание сухим воздухом (получение поверхности для нанесения контактов).

Микроструктуру поверхности образцов, полученных после травления, фотографировали с помощью контрольного микроскопа Zeiss Jenatech Inspection с цифровой видеокамерой при кратности увеличения от 25 до 1600.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Определяющими факторами, которые влияют на процесс травления, являются состав раствора и скорость перемешивания. На рис. 1 представлена зависимость скорости растворения v исследуемых материалов от соотношения компонентов травителя. Исследования проводили при температуре 293 К и скорости вращения диска $\gamma = 86 \text{ мин}^{-1}$. Из рисунка видно,

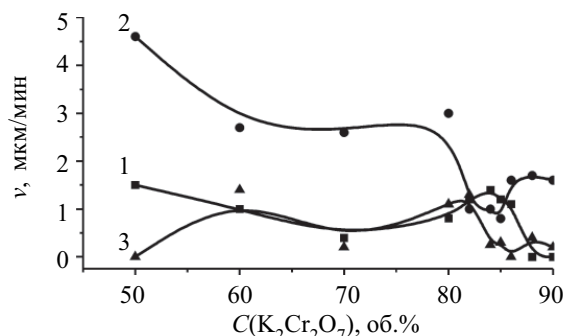


Рис. 1. Концентрационные зависимости скорости травления Bi_2Te_3 (1), $n-(Bi_2Te_3)_{0,9}(Sb_2Te_3)_{0,05}(Sb_2Se_3)_{0,05}$ (2) и $p-(Bi_2Te_3)_{0,25}(Sb_2Te_3)_{0,72}(Sb_2Se_3)_{0,03}$ (3) в растворах системы $K_2Cr_2O_7-HBr$

что при увеличении содержания $K_2Cr_2O_7$ в травильной композиции от 50 до 70 об. % скорость травления для Bi_2Te_3 падает с 1,5 до 0,4 мкм/мин, причем последующее увеличение содержания $K_2Cr_2O_7$ до 84 об. % приводит к тому, что скорость травления увеличивается до 1,4 мкм/мин, а при 90 об. % падает до нуля. Для n -материала при содержании $K_2Cr_2O_7$ в HBr от 50 до 85 об. % скорость травления падает от 4,6 до 0,8 мкм, а увеличение содержания $K_2Cr_2O_7$ до 90 об. % приводит к небольшому росту скорости травления (до 1,6 мкм/мин). Для кристаллов p -материала при увеличении концентрации $K_2Cr_2O_7$ в HBr от 50 до 82 об. % скорость травления увеличивается от 0 до 1,3 мкм/мин, а увеличение содержания $K_2Cr_2O_7$ в травильной композиции до 90 об. % приводит к уменьшению скорости травления до 0,2 мкм/мин.

На основании этих данных, а также учитывая тот факт, что поверхность всех образцов после травления имеет зеркальный блеск, можно выбирать состав полирующего травителя в интервале концентраций 50—90 об. % $K_2Cr_2O_7$ в HBr для ХДП с необходимой для конкретных технологических процессов скоростью стравливания материала с поверхности. Эти же травители могут быть использованы как основа для разработки полирующих составов для химико-механического полирования.

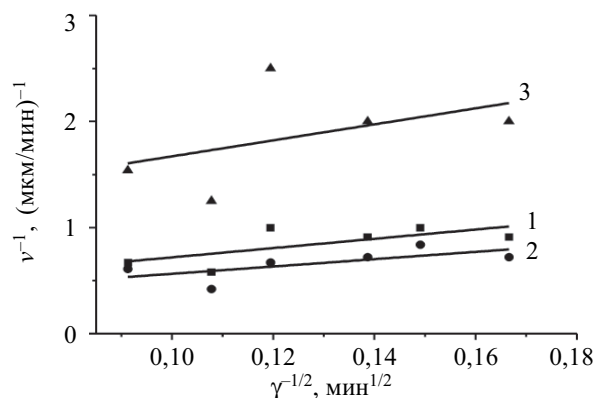


Рис. 2. Зависимость скорости травления Bi_2Te_3 (1), $n-(Bi_2Te_3)_{0,9}(Sb_2Te_3)_{0,05}(Sb_2Se_3)_{0,05}$ (2) и $p-(Bi_2Te_3)_{0,25}(Sb_2Te_3)_{0,72}(Sb_2Se_3)_{0,03}$ (3) от скорости вращения диска в 85%-м растворе $K_2Cr_2O_7$ в HBr

Для изучения процессов, протекающих при растворении исследуемых полупроводниковых материалов в травильных композициях $K_2Cr_2O_7$ -HBr, были проведены кинетические исследования, результаты которых приведены на **рис. 2**.

Как видно из рисунка, при $\gamma=36$ —120 мин⁻¹ для всех исследуемых материалов соответствующие прямые можно экстраполировать в начало координат, что свидетельствует о диффузионном механизме растворения. Также установлено, что кажущаяся энергия активации E_a во всех случаях не превышает 30 кДж/моль. Это означает, что лимитирующей для процесса растворения этих материалов является диффузионная стадия.

Для установления стабильности разработанных травильных растворов были проведены исследования изменения скорости травления после выдержки травильной смеси при комнатной температуре в течение 2, 24, 48, 72 и 96 часов. Как видно из **рис. 3**, на протяжении всего указанного промежутка времени скорость растворения исследуемых материалов практически не изменяется. Кроме этого, было установлено, что выдержка раствора в течение пяти суток не повлияла на его полирующие свойства.

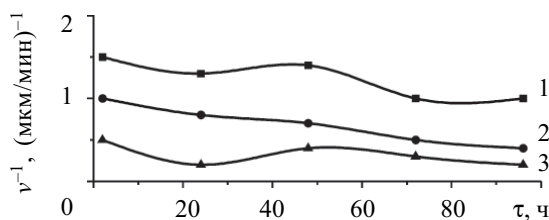


Рис. 3. Зависимость скорости травления Bi_2Te_3 (1), $n-(Bi_2Te_3)_{0,9}(Sb_2Te_3)_{0,05}(Sb_2Se_3)_{0,05}$ (2) и $p-(Bi_2Te_3)_{0,25}(Sb_2Te_3)_{0,72}(Sb_2Se_3)_{0,03}$ (3) от времени выдержки травителя (85 об.% $K_2Cr_2O_7$ в HBr)

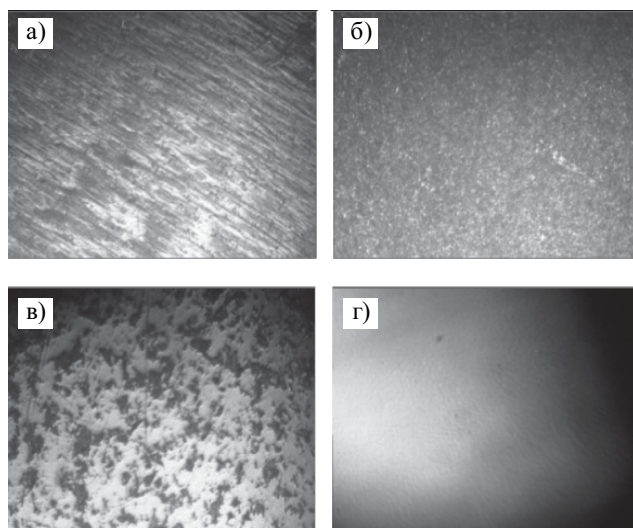


Рис. 4. Микроструктура поверхности кристаллов $p-(Bi_2Te_3)_{0,25}(Sb_2Te_3)_{0,72}(Sb_2Se_3)_{0,03}$ после резки струной с алмазным напылением (а) и после шлифования порошками М10 и М5 (б), полирования алмазной пастой АСМ-1 (в) и ХДП в разработанном травителе (г)

Результаты микроструктурного анализа поверхности одного из материалов после различных видов обработки представлены на **рис. 4**. После резки струной с алмазным напылением на поверхности образца наблюдаются борозды, царапины. После его шлифования абразивными порошками получается зернистая поверхность, а после обработки алмазными пастами на поверхности имеются лишь небольшие полированные области. То есть механическое полирование не позволяет получить идеально полированную поверхность, в отличие от химико-динамического полирования, после которого поверхность становится гладкой с зеркальным блеском.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что изученные бромвыделяющие травители с содержанием 50—90 об. % $K_2Cr_2O_7$ в HBr обладают стабильностью, хорошими полирующими свойствами, характеризуются небольшими скоростями травления и могут применяться для контролируемого утонения пластин до заданной толщины и снятия тонких слоев термоэлектрических материалов на основе теллурида висмута.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Soon-Jik Hong, Byong-Sun Chun. Microstructure and thermoelectric of n -type 95% Bi_2Te_3 -5% Bi_2Se_3 alloy produced by rapid solidification and hot extrusion // Materials Research Bulletin.— 2003.— № 38.— P. 599—608.
2. Лукьянова Л. Н., Кутавов В. А., Попов В. В., Константинов В. В. Гальваномагнитные и термоэлектрические свойства многокомпонентных твердых растворов на основе халькогенидов Bi, Sb // Физика твердого тела.— 2006.— Т. 48, № 4.— С. 607—613. [Luk'yanova L. N., Kutavov V. A., Popov V. V., Konstantinov V. V. // Fizika tverdogo tela. 2006. Vol. 48, N 4. P. 607]
3. Кутасов В. А., Лукьянова П. П., Константинов П. П. Высокоэффективные термоэлектрические материалы n -(Bi, Sb) $_2$ Te $_3$ для температуры ниже 200 К // Физика и техника полупроводников.— 2000.— Т. 34, № 4.— С. 389—393. [Kutasov V. A., Luk'yanova P. P., Konstantinov P. P. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2000. Vol. 34, N 4. P. 389]
4. Иванова Л. Д., Гранаткина Ю. В. Термоэлектрические свойства монокристаллов твердых растворов системы Bi_2Te_3 - Sb_2Te_3 в области температур 100—700 К // Неорганические материалы.— 2000.— Т. 36, № 7.— С. 810—814. [Ivanova L. D., Granatkina Yu. V. // Neorgan. materialy. 2000. Vol. 36, N 7. P. 810]
5. Кожемякин Г. Н., Олейникова А. Н., Иванов О. Н. и др. Исследование наноструктурированных твердых растворов халькогенидов висмута и сурьмы // Нові технології.— 2010.— Т. 28, № 2.— С. 36—39. [Kozhemyakin G. N., Oleinikova A. N., Ivanov O. N. i dr. // Novi tekhnologiyi. 2010. Vol. 28, N 2. P. 36]
6. Перевошиков В. А., Скупов В. Д. Особенности абразивной и химической обработки поверхности полупроводников.— Н. Новгород: ННГУ, 1992. [Perevoshchikov V. A., Skupov V. D. Osobennosti abrazivnoi i khimicheskoi obrabotki poverkhnosti poluprovodnikov. N. Novgorod: NNGU, 1992]
7. Toramoto I., Takayangi S. Dislocation etch pits on bismuth telluride crystals // J. Appl. Phys.— 1961.— Vol 32, № 1.— P. 118—120.
8. Phillips R. Techniques for Electron Microscopy, Oxford, 1961.
9. Сахаров Б. А. Металлургия и технология полупроводниковых материалов.— М. "Металлургия", 1972. [Sakharov B. A. Metallurgiya i tekhnologiya poluprovodnikovykh materialov. Moscow. "Metallurgiya". 1972]

К. ф.-м. н. В. М. ПОПОВ, А. С. КЛИМЕНКО,
А. П. ПОКАНЕВИЧ, В. Л. САМОТОВКА

УДК 621.382

Украина, г. Киев, НИИ микроприборов
E-mail: microic@voliacable.com, popovmc@i.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
09.08 2011 г.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТОЧЕК ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛА ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ

Метод основан на использовании визуального отображения в поляризационном микроскопе локально нагретых областей в пленке холестерического жидкого кристалла на поверхности кристалла интегральной схемы.

Распределение температуры на поверхности кристалла интегральной схемы (ИС) является следствием совокупного локального тепловыделения элементов схемы и определяется их мощностью, топологическими размерами и координатами расположения на поверхности. Среди локальных тепловыделяющих источников на поверхности кристалла ИС могут быть и такие, которые образуются при локальном возрастании тока потребления в области дефектов. Каждый локальный источник создает на поверхности кристалла свое температурное поле, и температура в любой точке поверхности является результатом наложения этих полей друг на друга. Это приводит к образованию рельефного температурного поля поверхности кристалла ИС, отражающего особенности действия и расположения источников тепловыделения.

Уровень температуры поверхности кристалла зависит от способности конструкции сборки (корпуса) ИС отводить от него тепло и определяется конфигурацией и размерами элементов конструкции и теплофизическими свойствами их материалов, а также поверхности корпуса, через которую происходит конвективный и радиационный теплообмен со средой. Заметное влияние на температурный рельеф поверхности кристалла ИС могут оказывать только значительные нарушения технологии сборки ИС, которые приводят к образованию несплошного, неоднородного или клиновидного слоя соединения кристалла с основанием сборки.

Определение максимальной температуры поверхности кристалла интегральной схемы является важной задачей, поскольку существует предельно допустимая температура, определяющая допустимость как потребляемой схемой мощности, так и ее применения в температурных условиях внешней среды.

Обоснование метода исследования

Для определения максимальной температуры поверхности кристалла ИС применяют только те методы, которые позволяют находить распределение температуры на ней. Наиболее часто для этих целей используются методы, основанные на зависимости инфракрасного излучения нагретой поверхности от ее температуры и на визуальной регистрации распределения температуры в термочувствительной пленке, покрывающей поверхность. Эти методы постоянно развиваются и совершенствуются, используя современные достижения оптической, видео-, компьютерной техники и программных средств.

Главным преимуществом методов, основанных на регистрации инфракрасного излучения нагретой поверхности и преобразовании этого излучения в видимое изображение [1], является отсутствие контакта с контролируемой поверхностью. Преимущество методов, основанных на использовании термочувствительных покрытий на исследуемой поверхности, состоит в экономичности и простоте их реализации [2–4]. Количественные значения основных параметров (температурное и геометрическое разрешение), получаемых с помощью методов приведенных направлений, сравнимы между собой.

Применительно к изделиям электронной техники методы на основе инфракрасной радиометрии и термочувствительных покрытий исследуемой поверхности разрабатывались и использовались в основном с целью обнаружения локальных областей с повышенной температурой («горячих точек»), в том числе образованных локальными тепловыделяющими дефектами.

В [5–7] проведен анализ используемых методов определения горячих точек в изделиях электронной техники. Показано, что из методов, основанных на использовании термочувствительных покрытий поверхности кристалла ИС, наиболее эффективно применяются те, в которых поверхность покрывается пленкой жидкого кристалла, получаемой из раствора.

В настоящей работе предлагается метод определения максимальных значений температуры и теплового сопротивления на поверхности кристалла ИС по полученному с помощью поляризационного микроскопа визуальному отображению локально нагретых

областей поверхности в осажденной на нее пленке холестерического жидкого кристалла (ХЖК).

В основе работы лежат следующие положения.

- Используются такие типы ХЖК, которые могут существовать в смектическом состоянии в некотором температурном диапазоне.

- В пленке ХЖК на поверхности кристалла ИС, включенной в электрический режим потребления мощности, образуются локальные области в холестерическом или изотропном состоянии, которые можно наблюдать с помощью поляризационного микроскопа.

- Локальные светорассеивающие непрозрачные области пленки в холестерическом состоянии образуются на прозрачном фоне пленки ХЖК в смектическом состоянии, а локальные полупрозрачные области пленки в изотропном состоянии образуются на фоне пленки ХЖК в светорассеивающем холестерическом состоянии.

- Визуально наблюдаемые локальные области в пленке ХЖК отображают локально нагретые области поверхности кристалла ИС, температура которых превышает температуру соответствующего фазового перехода.

- Граница каждой из визуально наблюдаемых локальных областей является изотермой на поверхности кристалла ИС с температурой, равной температуре соответствующего фазового перехода для используемого типа ХЖК.

- Тепловое сопротивление между точкой поверхности кристалла и средой определяется по температуре изотермы, проходящей через эту точку.

- Максимальное тепловое сопротивление между поверхностью кристалла ИС и средой определяется по минимальной мощности, потребляемой кристаллом ИС, при которой на поверхности кристалла еще наблюдается локальная область минимальных размеров.

- Обратимость визуальных отображений фазовых состояний в пленке ХЖК позволяет наблюдать локальные области фазовых состояний при разных значениях мощности, потребляемой кристаллом ИС.

Из сказанного следует суть предлагаемого метода.

Каждый тип ХЖК имеет фиксированное значение температуры фазовых переходов T_{ϕ} из смектического состояния в холестерическое ($T_{\phi}=T_{cx}$) и из холестерического состояния в изотропное ($T_{\phi}=T_{хи}$). Если в пленке ХЖК на поверхности кристалла ИС возникают визуально наблюдаемые локальные области ХЖК в каком-либо фазовом состоянии, то температура поверхности кристалла в точках, лежащих на границе локальной области, равна температуре соответствующего фазового перехода, т. е. границы этих областей являются изотермами. Так как локальная область возникает при определенной мощности P_k , потребляемой кристаллом ИС, тепловое сопротивление этих точек будет определяться как

$$R=(T_{\phi}-T_c)/P_k,$$

где T_c — фиксированная температура среды.

Изменяя P_k , можно увеличивать и уменьшать размеры локальных областей. Это значит, что расположе-

ние изотерм на поверхности кристалла ИС с температурой фазового перехода зависит от потребляемой кристаллом мощности и температуры среды. Следовательно, каждому i -му значению мощности P_{ki} соответствует определенное расположение изотерм, и в каждой точке такой изотермы тепловое сопротивление одинаково и вычисляется по формуле

$$R_i=(T_{\phi}-T_c)/P_{ki}.$$

Таким образом, зная тепловое сопротивление R_i точки поверхности, можно определить ее температуру T_i при любой мощности P_k , потребляемой кристаллом ИС: $T_i=P_k R_i+T_c$.

Максимальное тепловое сопротивление R_{max} точек поверхности кристалла ИС определяется по той минимальной мощности P_{kmin} , при которой в пленке ХЖК еще наблюдается единственная, минимальных размеров локальная область в соответствующем фазовом состоянии, т. е. $R_{max}=(T_{\phi}-T_c)/P_{kmin}$. Максимальная температура на поверхности кристалла определяется как $T_{max}=P_k R_{max}+T_c$.

Объекты исследования и реализация эксперимента

Объектами исследования служили четыре экспериментальных образца интегральной схемы УБ5701 ГП01, собранные в металлокерамических корпусах с двадцатью четырьмя выводами.

Все полученные в пленках ХЖК отображения распределения температуры поверхностей кристаллов образцов ИС фиксировали поляризационным микроскопом с длиннофокусными объективами MicroZoom (фирма Bausch&Lomb, США) с установленной видеокамерой Sony DXC-101P, соединенной с компьютером.

Операции нагрева подложек с нанесенными пленками ХЖК при их градуировке, а также при сушке образцов ИС после их отмывки, осуществляли на терморегулируемом столе Tempchuk System, Model TC100 (фирма Wentworth Labs, США) с точностью поддержания заданной температуры $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. В качестве источника питания образцов ИС и для определения вольт-амперных характеристик потребителей мощности на кристалле ИС использовали характериограф Tectronix 577D1 (фирма Tectronix, США).

Для подачи питания на ИС образец вставляли в контактное устройство, распаянное на монтажную плату. На контактные площадки монтажной платы, связанные с выводами корпуса ИС, предварительно напаивали нагрузочные элементы в соответствии с заданной электрической схемой.

В работе использовали шесть типов ХЖК с различными температурными интервалами существования смектической, холестерической и изотропной фаз, которые определяли в процессе их градуировки (процедура ее проведения описана ниже). В качестве растворителей ХЖК применяли толуол, петролейный эфир и трихлорэтилен.

Раствор ХЖК наносили на поверхность кристалла ИС, а после испарения растворителя на ней образовывалась пленка ХЖК. Для экспериментов выби-

рали такие ХЖК, которые при температуре среды до 40°C находятся в твердом состоянии.

Все исследования основывались на использовании результатов температурной градуировки пленок ХЖК, полученных из растворов на полированных поверхностях подложек из кремниевых пластин. Перед нанесением растворов ХЖК подложки прополаскивали в одном из растворителей в течение 2—3 мин и просушивали на терморегулируемом столе при температуре 75—80°C примерно 10 мин. Растворы с ХЖК наносили на поверхность подложки. В процессе градуировки пленок определяли наличие фазовых состояний ХЖК, температурные диапазоны их существования, температуру фазовых переходов, качество визуального отображения фазовых состояний с помощью поляризационного микроскопа.

По результатам градуировки производили выбор ХЖК и их растворов в разных растворителях для использования при исследовании образцов ИС. Определяющим условием выбора являлось наличие температурного диапазона существования пленки ХЖК в прозрачном смектическом состоянии, которое предшествует появлению светорассеивающего холестерического состояния.

Процесс градуировки пленки ХЖК на подложке включал в себя следующие операции. На стол поляризационного микроскопа устанавливали терморегулируемый стол, на который под объективом поляризационного микроскопа помещали подложку с пленкой ХЖК. Скрещивали поляризаторы микроскопа и включали нагрев стола. В процессе нагрева фиксировали те значения температуры, при которых наблюдался переход пленки ХЖК в прозрачное смектическое состояние, затем в светорассеивающее холестерическое ($T_{сх}$) и далее — в прозрачное изотропное состояние ($T_{хи}$). После нагрева до температуры изотропного состояния ХЖК питание стола отключали и фиксировали температуру фазовых переходов ХЖК в процессе охлаждения стола. В результате нескольких циклов нагревания и охлаждения стола устанавливали средние значения температуры фазовых переходов в исследуемом типе ХЖК.

После проведения температурной градуировки пленок различных типов ХЖК, полученных из различных растворов на полированных поверхностях кремниевых подложек, были сделаны следующие выводы: наиболее четкие визуальные отображения фазовых состояний дают пленки, осажденные из растворов ХЖК в петролейном эфире на подложки, которые прополаскивали в толуоле; значения температуры фазовых переходов в пленках ХЖК не зависят от типа растворителя.

Значения температуры фазовых переходов в исследуемых пленках шести типов ХЖК, полученных на поверхности подложек из растворов в петролейном эфире, лежат в диапазоне 40—63°C для $T_{сх}$ и 59,5—88°C для $T_{хи}$.

Эксперимент и его результаты

Определение тепловых параметров образцов ИС согласно предложенному методу выполнялось в следующей последовательности.

Каждый образец ИС со вскрытым корпусом (снятой крышкой) прополаскивали в толуоле и просушивали на терморегулируемом столе. После просушивания на поверхность кристалла образца пипеткой наносили каплю раствора ХЖК в петролейном эфире. После испарения петролейного эфира (примерно через 5 мин) корпус ИС вставляли в контактное устройство, соединенное через монтажную плату с источником питания и измерительными приборами в соответствии с электрической схемой подключения ИС.

Монтажная плата размещалась на столе поляризационного микроскопа с установленной видеокамерой для наблюдения поверхности кристалла ИС при скрещенных лучах поляризаторов. Напряжение питания ИС медленно повышали и устанавливали такое, при котором был четко виден топологический рисунок на всей поверхности кристалла. Это означало образование на поверхности кристалла пленки ХЖК в прозрачном смектическом состоянии — исходном для получения визуальной информации о температурном поле на поверхности кристалла (по температуре фазового перехода ХЖК из смектического состояния в холестерическое и по расположению соответствующих изотерм).

Дальнейшее повышение напряжения питания ИС приводило к появлению в пленке локальных светорассеивающих (непрозрачных) областей (рис. 1, а, б), в которых ХЖК находится в холестерическом состоянии. Они образуются на тех участках поверхности кристалла ИС,

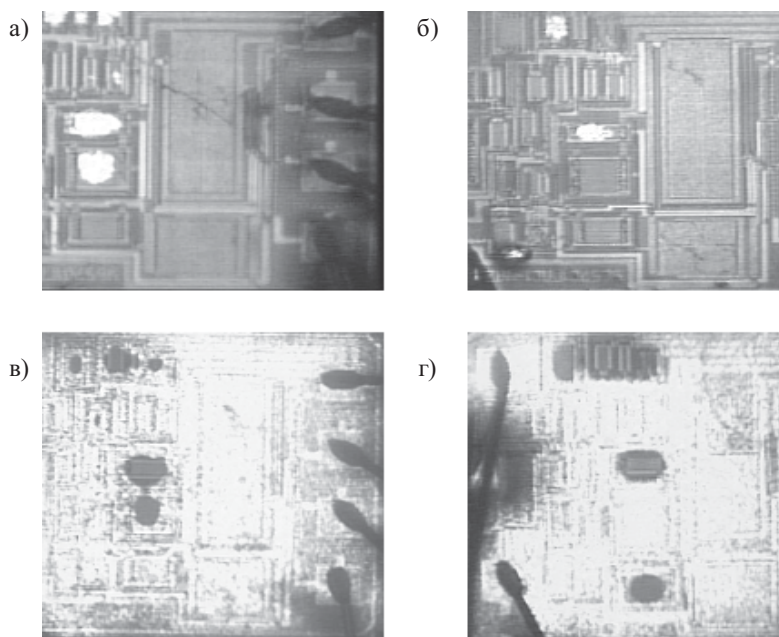


Рис. 1. Визуальные отображения локально нагретых областей поверхности кристалла образцов ИС в пленках различных типов ХЖК в холестерическом (а, б) и изотропном (в, г) фазовых состояниях

температура которых не ниже температуры фазового перехода ХЖК из смектического состояния в холестерическое $T_{\text{сх}}$. Внутри такой области температура выше $T_{\text{сх}}$, а на границе равна ей. Каждому значению мощности, потребляемой кристаллом ИС, при котором пленка переходила в прозрачное состояние, соответствовало установившееся через 10—12 мин после включения питания количество и расположение локальных областей и их размеры.

При повышении напряжения питания ИС размеры локальных областей в пленке ХЖК в холестерическом состоянии увеличивались, и при некотором значении напряжения пленка на всей поверхности кристалла переходила в холестерическое состояние. Оно служило исходным для второго этапа получения визуальной информации о температурном поле на поверхности кристалла ИС. Дальнейшее увеличение напряжения приводило к появлению локальных полупрозрачных областей ХЖК в изотропном состоянии на фоне пленки в светорассеивающем холестерическом состоянии (рис. 1, в, г). Установившаяся визуальная картина температурного поля поверхности кристалла ИС наступала также через 10—12 мин после включения ИС в режим потребления постоянной мощности.

Отметим, что время установления стационарной визуальной картины определяется теплоинерционными свойствами используемого металлокерамического корпуса. Поэтому для других типов корпусов оно может отличаться от приведенного.

Все точки поверхности кристалла, совпадающие с границами локальных областей на визуальной картине, нагреты до температуры фазового перехода ХЖК из одного фазового состояния (с внешней стороны границы области) в другое (внутри этой области).

При некоторых значениях мощности, потребляемой кристаллом ИС, в пленке образовывалось несколько локальных областей ХЖК в холестерическом состоянии (рис. 1, а, б) на фоне пленки в прозрачном смектическом состоянии или несколько локальных областей ХЖК в изотропном состоянии (рис. 1, в, г) на фоне пленки в светорассеивающем холестерическом состоянии.

По известным значениям температуры фазовых переходов, соответствующих границам локальных областей (изотермам), и мощности, потребляемой кристаллом $P_{\text{к}}$, были определены тепловые сопротивления R точек поверхности кристалла ИС, лежащих на границах локальных областей, относительно среды.

Постепенным уменьшением потребляемой мощности добивались того, что в пленке ХЖК оставалась всего одна локальная область минимальных размеров. Для расчета максимального теплового сопротивления R_{max} по приведенной выше формуле фиксировалась минимальная мощность P_{min} , при которой эта область еще наблюдалась.

Исследования экспериментальных образцов ИС показали, что локально нагретые области по-разному располагаются на поверхности кристаллов различных образцов ИС и проявляются в пленках ХЖК при разных потребляемых мощностях (рис. 1). При этом локальная область, которая при уменьшении мощности исчезала последней, во всех исследованных образцах располагалась в одном и том же месте (рис. 2, а, б, в). Только в одном из образцов одновременно с этой областью исчезала еще одна (рис. 2, г).

Расчет R_{max} на поверхности кристалла при использовании пленок всех типов показал наличие некоторого незначительного разброса значений для одного и того же образца (например, 71,2—73,4 К/Вт). Это связано с точностью определения потребляемой мощности и температуры фазовых переходов. Здесь также играет роль выдержка времени установления стационарного теплового состояния.

При фиксированных размерах и координатах источников тепла увеличение мощности, потребляемой кристаллом ИС, приводит к тому, что локальные области однородных фазовых состояний в пленке ХЖК над нагретыми участками поверхности кристалла увеличиваются и их границы удаляются от источников тепла. На расстояниях от центра источника тепла, превышающих наибольший размер источника, согласно принципу местного влияния [8], поверхность уже не испытывает возмущающего влияния источника тепла, и ее температура становится практически равной средней температуре поверхности кристалла ИС $T_{\text{сп}}$. Тепловое сопротивление точек поверхности с такой температурой является средним тепловым сопротивлением $R_{\text{сп}}$ между этой поверхностью и средой:

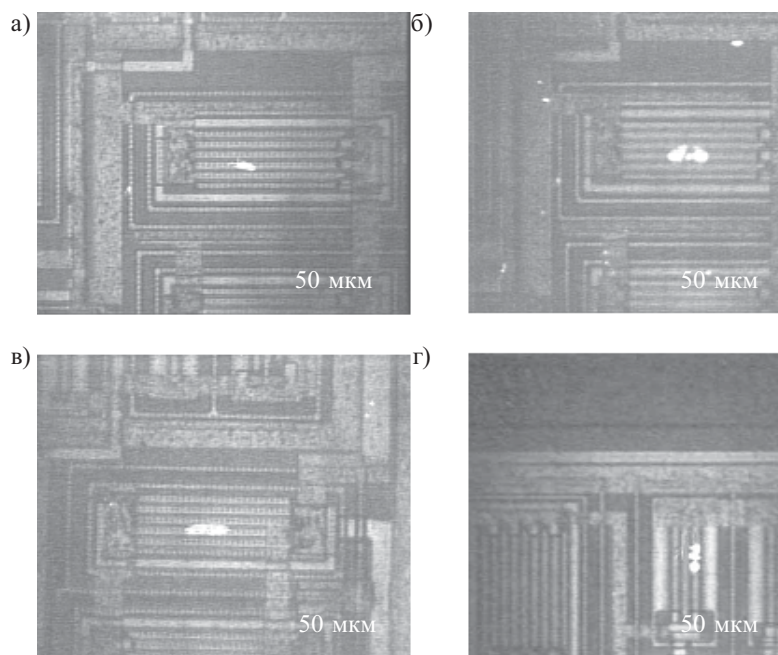
$$R_{\text{сп}} = (T_{\text{сп}} - T_{\text{с}}) / P_{\text{к}}.$$


Рис. 2. Минимальные локальные области в холестерическом фазовом состоянии в пленках различных типов ХЖК на поверхностях кристаллов образцов ИС

Тепловое сопротивление $R_{\text{сп}}$ практически определяется по мощности P_{max} , потребляемой кристаллом ИС, при которой изотерма фазового перехода располагается вблизи периметра кристалла ИС, т. е. $R_{\text{сп}} = (T_{\text{ф}} - T_{\text{с}}) / P_{\text{max}}$. Оно представляет собой сумму составляющих его тепловых сопротивлений:

$$R_{\text{сп}} = R_{\text{вп}} + R_{\text{р}} + R_{\text{сс}} + R_{\text{к}},$$

где $R_{\text{вп}}$ — сопротивление теплообмену внешней поверхности корпуса со средой;

$R_{\text{р}}$ — сопротивление растеканию тепла по корпусу;

$R_{\text{сс}}$ — сопротивление соединительного слоя кристалла с корпусом;

$R_{\text{к}}$ — сопротивление кристалла ИС.

Величины $R_{\text{вп}}$, $R_{\text{р}}$ и $R_{\text{к}}$ неизменны для выбранных корпуса и кристалла ИС. Следовательно, разброс значений сопротивления $R_{\text{сп}}$ в основном определяется разбросом значений $R_{\text{сс}}$, которое в свою очередь зависит от коэффициента теплопроводности материала слоя, его толщины и сплошности.

Для исследованных экспериментальных образцов тепловые сопротивления $R_{\text{сп}}$ составили 60,3; 68,4; 71,2 и 107,2 К/Вт. Эти результаты свидетельствуют о различии тепловых сопротивлений соединительного слоя кристалла с корпусом в образцах.

Структуру максимального теплового сопротивления между участком поверхности кристалла ИС с температурой T_{max} и средой можно представить в виде:

$$R_{\text{max}} = R_{\text{р}} + R_{\text{сп}},$$

где $R_{\text{р}}$ — тепловое сопротивление растеканию тепла по кристаллу (определяющее температурный рельеф на поверхности кристалла), $R_{\text{р}} = (T_{\text{max}} - T_{\text{сп}}) / P_{\text{к}}$.

Рассчитанные для образцов значения $R_{\text{р}} = R_{\text{max}} - R_{\text{сп}}$, равные 12,1; 14,4; 14,1 и 16 К/Вт, свидетельствуют о том, что в исследованных образцах локальные источники тепла не создают перегревов, существенно отличающихся от среднеповерхностной температуры кристалла.

Выводы

Таким образом, предложенный метод определения температуры и теплового сопротивления точек поверхности кристалла ИС, основанный на визуальном отображении локально нагретых областей в пленке ХЖК с известной температурой фазовых переходов, позволяет в рабочих условиях выявлять точки с максимальным тепловым сопротивлением на поверхности кристаллов ИС.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Rokotoniaina J. P., Breitenstein O., Langenkamp M. Localization of weak heat sources in electronic devices using highly sensitive Lock-in IR thermography // Material Science and Engineering. — 2002. — Vol. B91—92. — P. 481—484.
2. Pat. 5767489 USA. Enhanced resolution liquid crystal micro-thermography method and apparatus/ Mark S. Ferrier. — June, 1998.
3. Lin H., Khan M., Gao T. Dynamic of liquid crystal hot spot examination of functional failures on production testers // Proc. of the 20th International Symposium for Testing and Failure Analysis. — Los Angeles, USA. — 1994. — P. 81.
4. Haugen O., Johansen T. H., Chen H. et al. High resolution thermal imaging of hot spots in superconducting films // Proceed. of Applied Superconductivity Conference. — USA, Seattle. — 2006. — P. 27.
5. Popov V. M., Klimenko A. S., Pokanevich A. P. et al. Liquid — Crystal Thermography of Hot Spots on Electronic Components // Russian Microelectronics. — 2007. — Vol. 36, N 6. — P. 392—401.
6. Пат. № 77499 України. Спосіб виявлення локальних джерел тепловиділення в зразках кристалів інтегральних схем та напівпровідникових приладів / В. М. Попов, А. С. Клименко, О. П. Поканевич, М. В. Мошель. — 15. 12. 2006. [Pat. № 77499 Ukrayini. / V. M. Popov, A. S. Klimenko, O. P. Pokanevich, M. V. Moshel'. 15. 12. 2006]
7. Попов В. М., Клименко А. С., Поканевич А. П. Усовершенствованный метод выявления «горячих точек» в изделиях микроэлектроники // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2008. — № 3. — С. 55—58. [Popov V. M., Klimenko A. S., Pokanevich A. P. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2008. N 3. P. 55]
8. Дульнев Г. Н., Семьяшкин Э. М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. — Л.: Энергия, 1968. [Dul'nev G. N., Semyashkin E. M. Teploobmen v radioelektronnykh apparatakh. L. Energiya, 1968]

НОВЫЕ КНИГИ

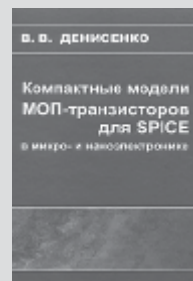
НОВЫЕ КНИГИ



Денисенко В. В. Компактные модели МОП-транзисторов для SPICE в микро- и нанoeлектронике. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2010. — 408 с.

В книге систематически изложены принципы построения компактных моделей МОП-транзисторов для схемотехнического моделирования электронных цепей, в том числе СБИС. Рассмотрены проблемы моделирования, физические процессы в микро- и нанометровых МОП-транзисторах, методы формирования уравнений компактных моделей, особенности моделей BSIM, EKV, PSP, HiSIM и др., табличные модели, полунатурные модели.

Для разработчиков интегральных схем и электронной аппаратуры, разработчиков САПР СБИС, научных работников и аспирантов. Может быть полезна студентам физических специальностей университетов.



П. Л. НЕЛЮБА

УДК 621. 315. 592

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников
им. В. Е. Лашкарёва НАНУ
E-mail: matveeva@isp.kiev.ua, nelyuba@ukr.net

Дата поступления в редакцию
21.07.2011 г.

ОСОБЕННОСТИ КОНДЕНСАЦИИ ФУЛЛЕРЕНОВ ИЗ МОЛЕКУЛЯРНОГО ПУЧКА В ВАКУУМЕ

Исследованы особенности конденсации фуллеренов из сублимированного пучка в вакууме на неподогретых подложках. Выявлены условия укрупнения кристаллитов C_{60} в конденсате и появления в нем графитоподобной и алмазоподобной фаз.

При современном уровне развития науки и техники особое внимание уделяется нанотехнологиям, наноматериалам и наногетероструктурам. На их основе разрабатываются новые функциональные элементы с фуллеренами и углерод-углеродными композитами для применения в сенсорных системах, солнечной энергетике, опто- и микроэлектронике, биомедицине [1, 2]. В настоящее время используются две основные технологии получения твердотельных гетероструктур с фуллереновыми пленками: осаждение их из растворов в органических растворителях и вакуумное напыление. Первый метод более простой, но он, к сожалению, не позволяет получить совершенную границу «пленка — подложка». Второй метод более технологичен, позволяет улучшить структуру и электронные свойства границы раздела, а также изменять ближний порядок конденсата, который определяется степенью электронной конфигурации атомов углерода (sp). Среди его аллотропных карбоновых форм выделяют алмаз (sp^3), графит (sp^2), карбин (sp^1) с четырьмя, тремя или одним ближайшими соседними атомами, соответственно. Существуют также гибридные формы, например, (sp^2+sp^3)-гибридизация приуса алмазоподобным углеродным пленкам.

Молекула фуллерена C_{60} состоит из 60 атомов углерода с sp^2 -электронной конфигурацией, представляет собой замкнутый выпуклый кластер с пятиугольными и шестиугольными гранями, имеет 60 вершин, 12 пентагонов и 20 гексагонов [3, 4]. Молекулы C_{60} наиболее стабильны среди других фуллеренов, гексагоны в них соединяются двойными $C=C$ -связями, а пентагон с гексагоном — одинарной $C-C$ -связью [4]. В обычных условиях фуллерены образуют молекулярные кристаллы (фуллериты) с электронной sp^2 -гибридизацией молекул путем слабого Ван-дер-Ваальсового взаимодействия между ними. В сравнении с графитом и алмазом фуллериты менее стабильны, поэтому при внешних воздействиях они могут

распадаться, образуя другие углеродные формы [5, 6]. Низкая температура сублимации фуллерита C_{60} ($350^\circ C$) [7] позволяет довольно просто получать конденсаты термическим осаждением фуллеренов в вакууме на различные подложки.

В [5, 8] показано, что состав и степень гибридизации атомов углерода в термически осажденных пленках можно изменять, модифицируя дополнительными воздействиями поток фуллеренов в пространстве между испарителем и подложкой. Цель данной работы заключалась в выявлении и установлении особенностей конденсации молекул C_{60} на различных подложках без дополнительных физических воздействий на поток фуллерена, сублимированного в процессе осаждения.

Технология и методы исследования

Пленки получали на универсальной вакуумной установке ВУП-5 М термической сублимацией фуллеритового порошка C_{60} (степень чистоты 99,9 %) и конденсацией фуллерена на неподогретые подложки. В качестве подложек использовали пластины Si (100) и GaAs (100), полированные химико-динамическим методом, покровное стекло, слюду. Их поверхность перед напылением обрабатывали в центрифуге с изопропиловым спиртом. Подложки не подогревали во избежание возникновения в гетероструктуре термических напряжений. Фуллеритовый порошок C_{60} помещали в танталовую эффузионную ячейку Кнудсена, нагрев которой осуществляли резистивным методом. Температуру испарителя задавали изменением величины электрического тока через ячейку. Пленки осаждались при одной и той же температуре источника из диапазона $350\text{—}650^\circ C$, но при разном расстоянии между подложкой и испарителем (3—10 см). Толщина конденсата составляла 0,1...2 мкм и измерялась на интерферометре МИИ-4.

Методы исследования включали в себя атомно-силовую микроскопию (АСМ), спектроскопию комбинационного рассеяния света (КРС), измерение внутренних механических напряжений (ВМН). Все измерения были проведены при комнатной температуре. Наноморфологию поверхности конденсата исследовали на атомно-силовом микроскопе «Nanoskop III a» в режиме периодической моды. Спектры КРС (рамановского сдвига частоты) измеряли на двойном монохроматоре ДФС-24 в геометрии на отражение.

Они возбуждались излучением аргонового лазера с длиной волны 514,5 нм и регистрировались охлаждаемым фотоэлектронным умножителем ФЭУ-16 в режиме счета фотонов. Для предохранения образцов от перегрева лазерное излучение фокусировалось на их поверхность цилиндрической линзой. Величину и знак ВМН в пленке определяли по формуле Стоуни [9], которая связывает упругую деформацию σ в пленке с кривизной изогнутой гетеросистемы:

$$\sigma = Ed^2 [6(1-\nu)Rt]^{-1}, \quad (1)$$

где E , ν , d — соответственно модуль Юнга, коэффициент Пуассона и толщина подложки;

t — толщина пленки;

R — радиус изгиба гетеросистемы.

Расположение конденсата на выпуклой стороне подложки приводит к возникновению в пленке сжимающих напряжений, а в подложке — растягивающих.

Результаты и их обсуждение

При низкой температуре источника сублимации фуллеренов (350—450°C), независимо от типа и расположения подложек по отношению к нему, поверхность пленок всегда была гладкой (рис. 1, а), с равномерным расположением агломератов молекул на ней. В спектрах КРС наблюдались узкие полосы при значениях частоты 1425, 1470 и 1575 см⁻¹ (рис. 1, б). Они отражают колебательные моды молекул C₆₀ с симметрией H_g, A_g и H_g, соответственно. Наиболее интенсивная полоса при частоте 1470 см⁻¹ отвечает симметричному колебанию пентагонов в молекуле, а полосы при 1425 и 1575 см⁻¹ — колебанию гексагонов [10]. При увеличении температуры испарителя и приближении подложек к нему морфология поверхности конденсата и вид спектров КРС существенно изменялись. На рис. 2 приведены АСМ-изображения поверхности и спектры КРС для пленок, осажденных на подложки кремния при одной температуре испарителя и разном расстоянии от него. На поверхности конденсата появлялись хаотически расположенные крупные агломераты (рис. 2, а), размер и количество которых постепенно возрастали с уменьше-

нием расстояния. В итоге пленка приобретала развитую поверхность, характерную для аморфных углеродных пленок (рис. 2, в). В спектрах КРС полученных пленок интенсивность полосы, связанной с колебаниями пентагонов, уменьшалась, ее положение не изменялось при изменении условий конденсации из пучка на подложки. Интенсивность и полуширина полос, отражающих колебания гексагонов, постепенно увеличивались, полоса при 1575 см⁻¹ сдвигалась в высокочастотную область спектра (рис. 2, б, в). В спектрах КРС пленок, осажденных при 650°C на стеклянные подложки, расположенные в 10 см от испарителя, видна слабая полоса при 1470 см⁻¹ на интенсивном фоне (рис. 3, кривая 1). При уменьшении расстояния между подложкой и испарителем до 3 см она исчезала вместе с фоном, появлялись широкие полосы с максимумами при 1590 и 1360 см⁻¹ (рис. 3, кривая 2). Появление в спектрах КРС новых полос связано с изменением структуры ближнего порядка в пленках при образовании других углеродных фаз наряду с фуллеренами [8], а снижение интенсивности полосы при 1470 см⁻¹ — с уменьшением их вклада в спектры КРС. Поскольку одинарная связь в молекуле C₆₀ между гексагонами и пентагонами в 1,39 раза длиннее чем двойная между гексагонами, она легче разрывается. При деструкции молекул C₆₀ появляются состоящие из гексагонов «осколки», которые являются структурной единицей графита [4]. Увеличение их количества в пленке способствует образованию графитовой фазы, в результате чего в спектре КРС появляется полоса, которая обычно наблюдается в графите (graphitic или G-полоса) при 1590 см⁻¹ (рис. 2, б и в; рис. 3, кривая 1).

Квадратичный рост интенсивности сублимированного потока фуллеренов при уменьшении расстояния «подложка — испаритель» приводит к разупорядочению графитовых кластеров и дальнейшему изменению спектров КРС. В области 1360 см⁻¹ появляется новая полоса, соответствующая разупорядочению графита с образованием алмазоподобной фазы углерода (D-полоса), фон при этом исчезает. Из рис. 2 и 3 следует, что фон в спектрах КРС возрастает с увели-

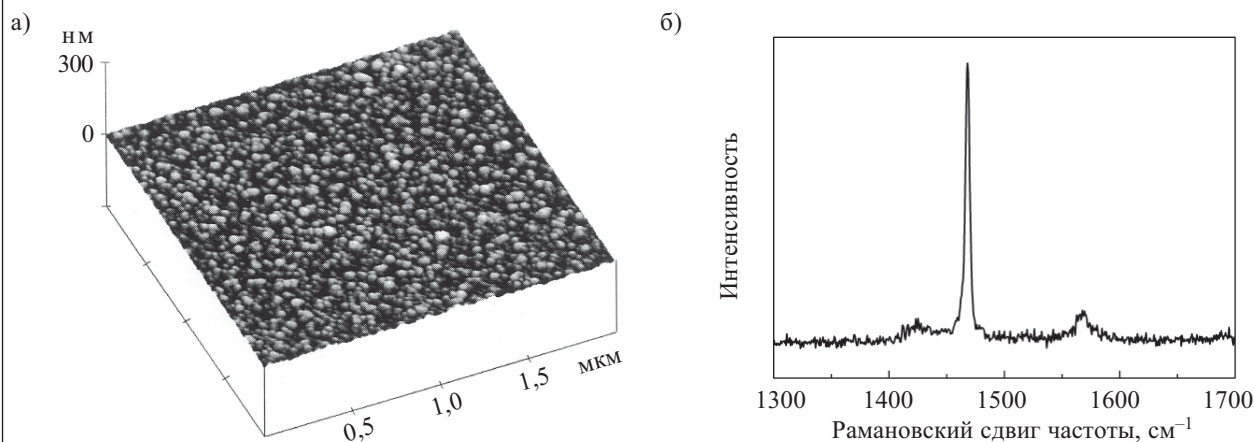


Рис. 1. Типичное АСМ-изображение поверхности (а) и спектр КРС (б) пленок на Si, полученных при температуре сублимации фуллеренов 350—450°C

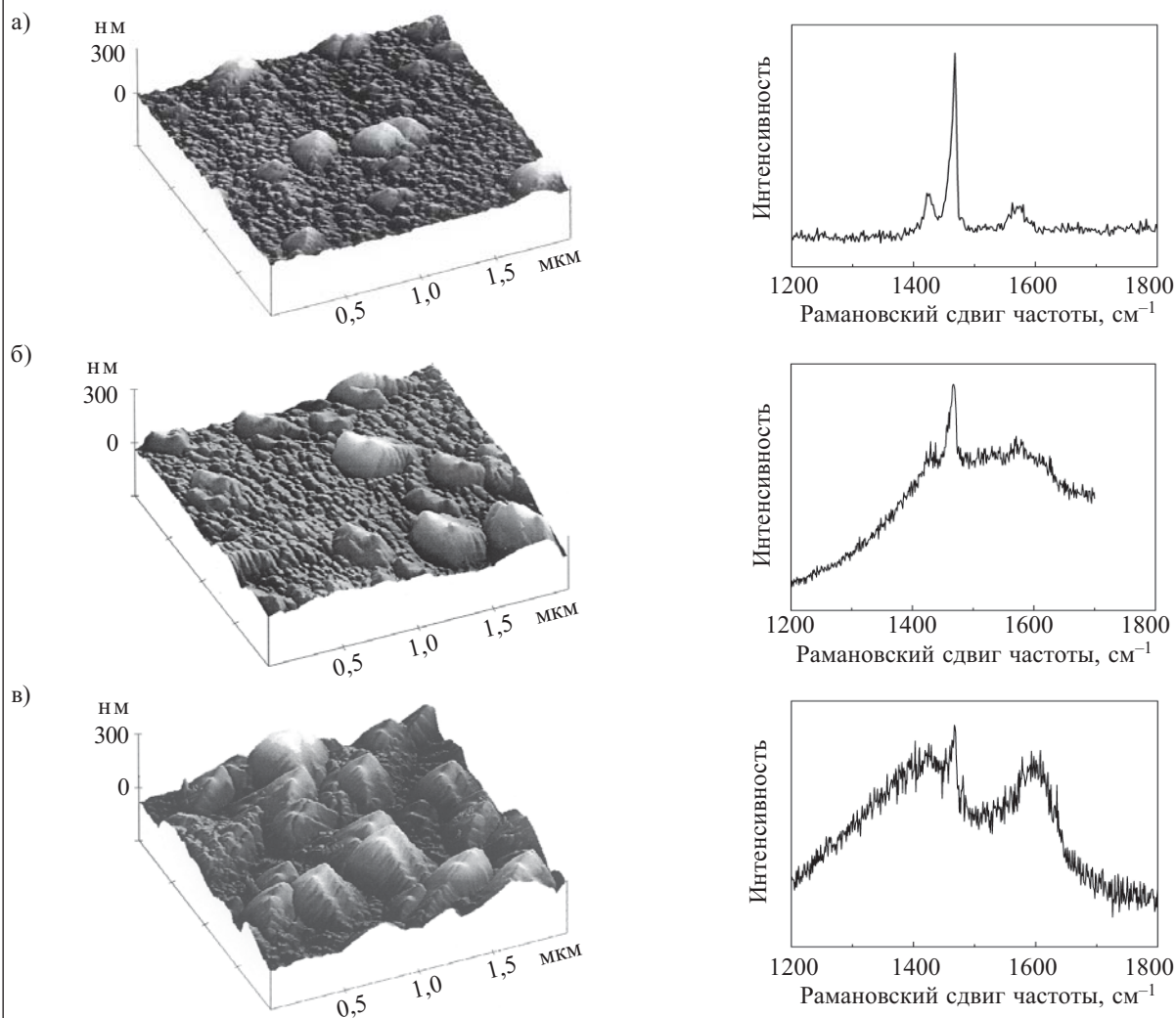


Рис. 2. АСМ-изображения поверхности и спектры КРС пленок, осажденных на кремниевые подложки при температуре испарителя 550°C и расстоянии от него 10 (а), 7 (б) и 5 см (в)

чением доли графитоподобной фазы и убывает при появлении алмазоподобной. Этот факт можно объяснить образованием углеродных гексагональных кластеров (шестиугольных колец) со спаренными $C=C$ -связями при развале молекул C_{60} . Согласно [11,12], композитные фуллеренсодержащие гетероструктуры люминесцируют в необычной для фуллеренов C_{60} спектральной области (видимой), хотя обычно они светят в ближней инфракрасной области [10]. По-видимому, одновременно с возбуждением спектров КРС возгорается также видимая фотолюминесценция. Ее интенсивность определяется структурой ближнего порядка конденсата (степенью sp). Образование алмазоподобной фазы в конденсате сопровождается регибридизацией атомов углерода (sp^2 прибавляется sp^3). При этом появляются оборванные одиночные C -связи (центры безызлучательной рекомбинации), которые гасят фотолюминесценцию, и фон исчезает.

Для выяснения механизмов распада фуллеренов и образования новых фаз в конденсате, которые происходят не только при росте температуры испарителя, но и с приближением подложек к нему, были изменены условия сублимации и конденсации сублими-

рованного потока на подложки. Пленки осаждали при температуре испарителя 470°C из оставшегося под вакуумом порошка C_{60} в ячейке после предыдущего его испарения при температуре 550°C. Осаждение проводилось на подложки из слюды и арсенида галлия, расположенные на расстоянии 10 см от испарителя. Из рис. 4, где приведены изображения поверхности пленок на слюде разной толщины, видно, что морфология поверхности пленки не изменяется с увеличением ее толщины. Такая же морфология наблюдалась у пленок, полученных при тех же условиях осаждения на арсенид галлия. На рис. 5 приведена морфология поверхности и спектры КРС пленок, полученных на подложках арсенида галлия одностадийным и двухстадийным методами. На первой стадии выращивали подслои толщиной 0,2 мкм, затем на него осаждали слой толщиной 0,8 мкм. Общая толщина конденсата на подложке составляла 1 мкм. Сравнение изображений на рис. 4 и 5, а указывает на увеличение размера зерен почти в 2 раза при конденсации фуллерена из предварительно отожденного источника сублимации фуллеренов. Это согласуется с результатом, полученным авторами [13] при осажде-

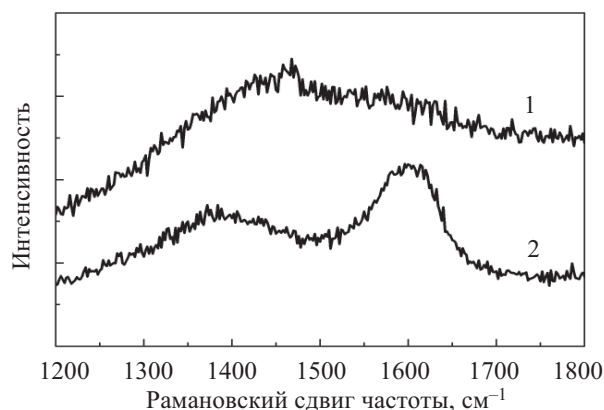


Рис. 3. Спектры КРС пленок, осажденных на стеклянные подложки при температуре испарителя 550°C и расстоянии от него 10 (кривая 1), и 3 (кривая 2) см

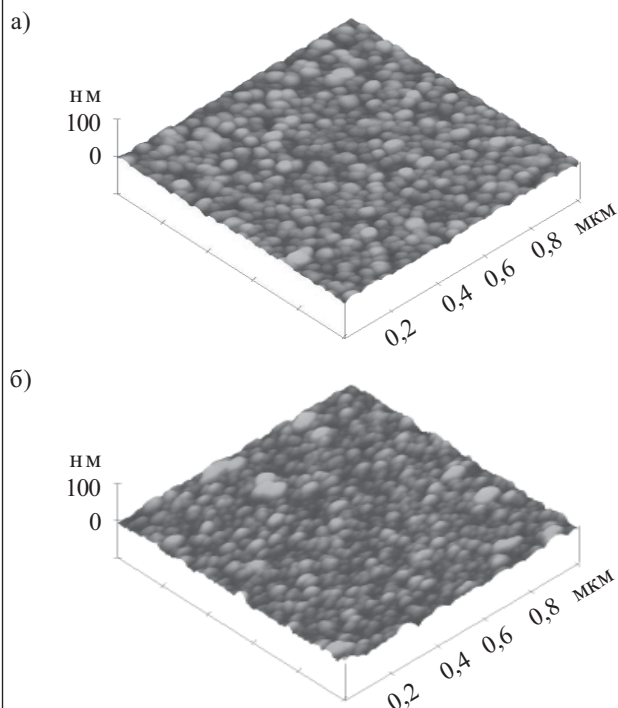


Рис. 4. АСМ-изображения поверхности пленок толщиной 0,2 (а) и 0,8 мкм (б) на подложках из слюды, полученных при температуре сублимации 470°C

нии пленок из сублимированного пучка фуллеренов в вакууме на кремниевые подложки с подслоем C_{60} толщиной 500–600 Å.

В отличие от спектров на рис. 2 и 3, в спектрах КРС, приведенных на рис. 5, б, четко проявляются три колебательные моды, характерные для фуллеренов C_{60} . Увеличение интенсивности и уменьшение полуширины полосы при частоте 1470 $см^{-1}$ подтверждают увеличение размера зерен (кривая 2) при двухстадийном росте конденсата. Отсутствие же полос, характерных для других углеродных фаз (графитоподобной, алмазоподобной), говорит об отсутствии распада фуллеренов в источнике сублимации при

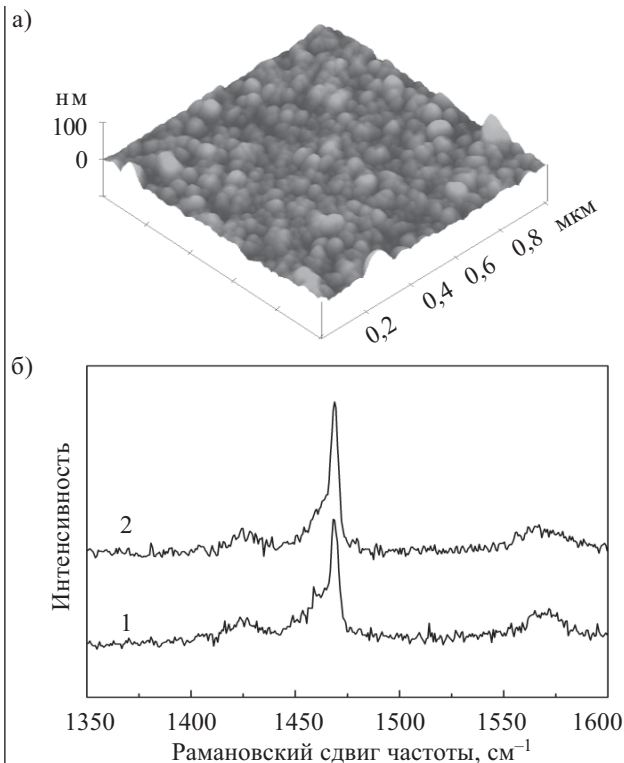


Рис. 5. АСМ-изображение поверхности (а) и спектры КРС (б) пленки, осажденной при 470°C на подложки из GaAs без подслоя (кривая 1) и с подслоем C_{60} толщиной 0,2 мкм (кривая 2)

нагреве его до 550°C. Следовательно, деструкция фуллеренов происходит при их взаимодействии с подложкой. Так как с увеличением температуры испарителя, а также с приближением подложек к нему вероятность распада C_{60} возрастает (см. рис. 2 и 3), это означает, что структура ближнего порядка и степень гибридизации углеродных атомов в конденсате определяются «конкуренцией» двух указанных выше факторов.

Поскольку подложки не подогревались, термическая компонента механических напряжений в гетероструктурах отсутствует. Уровень собственных напряжений в них зависел от условий конденсации сублимированного пучка C_{60} на подложки. Измерения кривизны гетеросистем показали, что в пленках присутствуют ВМН сжатия. Уровень ВМН в пленках, которые не содержали дополнительных углеродных фаз, составлял $(6...8) \cdot 10^7$ Па в зависимости от толщины конденсата. Напряжения понижались по мере увеличения его толщины, что характерно для тонких конденсированных пленок [9]. В композитных углеродных пленках уровень ВМН уменьшался в 2–3 раза, что можно объяснить ростом плотности конденсата при образовании других углеродных фаз, т. к. плотность фуллеренов ($1,7 г \cdot см^{-3}$) меньше плотности графита ($2,265 г \cdot см^{-3}$) и алмаза ($3,5 г \cdot см^{-3}$). Подобный эффект наблюдался в аморфных углеродных пленках на Si [14]. В них уровень ВМН возрастал при уменьшении содержания более плотной алмазоподобной фазы.

добной фазы и увеличении менее плотной графитоподобной.

Выводы

Таким образом, исследования особенностей конденсации фуллеренов C_{60} из молекулярного пучка в вакууме показали возможность управления структурой ближнего порядка атомов углерода в конденсате без дополнительных физических воздействий на фуллерены в пространстве «испаритель — подложка». Установленные механизмы деструкции молекул C_{60} и условия зарождения графитоподобной и алмазоподобной фаз позволяют определить технологические условия увеличения размера зерен в фуллеритовых пленках и уменьшения внутренних механических напряжений в композитных пленках, что сказывается на электронных, оптических и механических свойствах пленок и гетеросистем. Полученные результаты могут быть использованы в электронной и сенсорной технике, биомедицине.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Витязь П. А., Свидуневич Н. А. Основы нанотехнологий и наноматериалов. Минск: Выс. шк., 2010. [Vityaz' P. A., Svidunovich N. A. Minsk. Vys. shk. 2010]
2. Витязь П. А., Шпилевский Э. М., Шпилевский М. Э. Фуллеренсодержащие материалы и функциональные элементы на их основе // Нанотехнологии: наука и производство. — 2009. — № 2. — С. 12—16. [Vityaz' P. A., Shpilevskii E. M., Shpilevskii M. E. // Nanotekhnologii: nauka i proizvodstvo. 2009. N 2. P. 12]
3. Елецкий А. В., Смирнов Б. М. Кластер C_{60} — новая форма углерода // Успехи физических наук. — 1991. — Т. 161, № 7. — С. 173—191. [Yeletskii A. V., Smirnov B. M. // Uspekhi fizicheskikh nauk. 1991. Vol. 161. N 7. P. 173]
4. Сыткарёв В. Т. Структура графитов и фуллеренов // В сборн. науч. тр. Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах. — Минск: Изд. центр БГУ, 2011. — С. 406—411. [Sytkarev V. T. // V sborn. nauch. tr. Fullereny i nanostruktury v kondensirovannykh sredakh. Minsk: Izd. tsentr BGU, 2011. P. 406]
5. Haramoto H., Xiaodong Zhu, Yonghua Xu et al. Allotropic conversion of carbon-related films by using energy beams // Физика твердого тела. — 2002. — Т. 44, вып. 4. — С. 643—648. [Haramoto H., Xiaodong Zhu, Yonghua Xu et al. // Fizika tverdogo tela. 2002. Vol. 44. Is. 4. P. 643]
6. Матвеева Л. А., Юхимчук В. А., Нелюба П. Л., Хиврич В. И. Радиационная стойкость гетеросистем C_{60}/Si и $GeO_x/C_{60}/Si$ // В сборн. науч. тр. Углеродные наноструктуры. — Минск: Изд. центр БГУ, 2006. — С. 232—244. [Matvyeeva L. A., Yukhimchuk V. A., Nelyuba P. L., Khivrich V. I. // V sborn. nauch. tr. Uglerodnye nanostruktury. Minsk: Izd. tsentr BGU. 2006. P. 232]
7. Дроздов А. Н., Вус А. С., Пуха В. Е., Пугачев А. Т. Особенности испарения пленок C_{60} // Физика твердого тела. — 2008. — Т. 50, вып. 1. — С. 188—190. [Drozdov A. N., Vus A. S., Pukha V. Ye., Pugachev A. T. // Fizika tverdogo tela. 2008. Vol. 50. Is. 1. P. 188]
8. Huck H., Halac E. B., Dall'Asen A. G. et al. Properties of Carbon films from C_{60} ions beams // Proceed. of 3rd Internat. Conf. «Diamond and Other Carbon Materials — III». Italy, Florence. — 2002. — ©Techna Group s.l.r., 2003.
9. Гоффман Р. У. Механические свойства тонких конденсированных пленок / В кн.: Физика тонких пленок // Под ред. В. Г. Хасс, Р. Э. Тун. — Москва: Мир, 1968. — С. 225—298. [Goffman R. U. / V kn.: Fizika tonkikh plenok // Pod red. V. G. Khass, R. E. Tun. Moscow. Mir. 1968. P. 225]
10. Макарова Т. Л. Электрические и оптические свойства мономерных и полимеризованных фуллеренов // Физика и техника полупроводников. — Т. 35, № 3. — С. 257—293. [Makarova T. L. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. — Vol. 35, N 3. P. 257]
11. Васин А. В., Матвеева Л. А., Юхимчук В. А. Фотолуминесценция аморфного углерода в пленках $a-C: C_{60}$ // Журнал технической физики. — 2002. — Т. 28, вып. 14. — С. 32—37. [Vasin A. V., Matvyeeva L. A., Yukhimchuk V. A. // Zhurnal tekhnicheskoi fiziki. 2002. Vol. 28, Is. 14. P. 32]
12. Матвеева Л. А., Нелюба П. Л., Шпилевский Э. М. Оптические свойства пленок фуллерита C_{60} , конденсированных на кремневых подложках // В сб. науч. тр. Наночастицы в конденсированных средах. — Минск: Изд. центр БГУ, 2008. — С. 24—29. [Matvyeeva L. A., Nelyuba P. L., Shpilevskii E. M. // V sb. nauch. tr. Nanochastitsy v kondensirovannykh sredakh. Minsk: Izd. tsentr BGU. 2008. P. 24]
13. Макарова Т. Л., Захарова И. Б., Зубкова Т. И., Вуль А. Я. Ориентированный рост бескислородных кристаллов C_{60} на кремневых подложках // Физика твердого тела. — 1999. — Т. 41, вып. 2. — С. 354—359. [Makarova T. L., Zakharova I. B., Zubkova T. I., Vul' A. Ya. // Fizika tverdogo tela. 1999. Vol. 41. Is. 2. P. 354]
14. Васин А. В., Гонтарь А. Г., Матвеева Л. А. и др. Механические напряжения в системе $a-C: H/Si$ // Функциональные материалы. — 1999. — Т. 6, № 6. — С. 355—358. [Vasin A. V., Gontar' A. G., Matvyeeva L. A. i dr. // Funktsional'nye materialy. 1999. Vol. 6. N 6. — P. 355]

НОВЫЕ КНИГИ

Реутов А. П., Черняков М. В., Замуруев С. Н. Автоматизированные информационные системы: методы построения и исследования. — Москва: Радиотехника, 2010. — 328 с.

Рассмотрены принципы построения автоматизированных информационных систем, баз и банков данных и основы создания телекоммуникационных вычислительных сетей, включая всемирную информационную сеть Интернет и порталные технологии, проблемы защиты информации и пути использования интеллектуальных систем, а также приведен универсальный метод оценки эффективности автоматизированных информационных систем и дан алгоритм его использования на примере аэродрома гражданской авиации.

Для научных работников по специальностям в области техники, технологий и бизнеса, а также руководителей и сотрудников предприятий и фирм, использующих в своей профессиональной деятельности новые информационные технологии. Может быть полезна студентам, аспирантам и преподавателям вузов.



Д. В. КУЗЕНКО, д. ф.-м. н. А. И. БАЖИН, В. А. СТУПАК,
к. х. н. Н. Г. КИСЕЛЬ, В. В. ДОРОФЕЕВА, И. Н. СТАРШИНОВ,
А. Е. ПОКИНТЕЛИЦА

УДК 537.226.4; 537.226.82

Украина, г. Донецк, НТЦ «Реактивэлектрон» НАНУ,
Донецкий национальный университет
E-mail: danil.kuzenko@gmail.com

Дата поступления в редакцию
15.07.2011 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕПОЛЯРИЗАЦИИ СЕГНЕТОКЕРАМИКИ $(\text{Pb,Sr})(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$

Показано, что отжиг сегнетокерамики при критической температуре $T_{\text{кр}}$, которая ниже точки Кюри, приводит к разупорядочению доменной структуры, в результате чего происходит резкое снижение пьезоэлектрических свойств материала.

В физике твердого тела в целом и в физике сегнетоэлектриков вопрос влияния температуры отжига на свойства, стабильность доменной структуры и фазовые переходы является одним из самых значимых. В общем случае температурные условия стабильности существования структурных модификаций известны. Так, в сегнетоэлектрических материалах нагрев выше точки Кюри T_C приводит к переходу материала в кубическую фазу. Теоретическое рассмотрение этого вопроса осложнено тем, что термодинамическая теория фазовых переходов II рода неприменима в самой точке фазовых переходов и некоторой ее окрестности [1]. Поэтому большое значение имеют экспериментальные работы в этом направлении. Можно выделить несколько вопросов, которые в настоящее время активно исследуются: влияние температуры на деформационные характеристики сегнетокерамики [2], изучение температурных зависимостей степени доменных переориентаций [3], процессы долговременной релаксации поляризованных сегнетоэлектриков при различной термической предыстории [4], взаимосвязь свойств и микроструктуры сегнетокерамики [5].

Подобные исследования имеют большое прикладное значение ввиду широкого применения сегнетокерамики в электронной технике.

В настоящей работе экспериментально исследуется изменение структуры и пьезоэлектрических свойств после отжига поляризованных сегнетокерамических образцов состава $(\text{Pb}_{0,95}\text{Sr}_{0,05})(\text{Zr}_{0,58}\text{Ti}_{0,42})\text{O}_3$ ромбоэдрической симметрии с целью определения температурного интервала деградации их пьезосвойств.

Проведение эксперимента

Образцы в виде дисков размерами 9×1 мм были изготовлены по керамической технологии: синтез происходил при температуре 980°C в течение 2 ч, а спекание — при температуре 1320°C в течение 2 ч.

На поверхность образцов наносили серебряные электроды. Поляризация происходила в постоянном электрическом поле напряженностью 3 кВ/мм при температуре 140°C в течение 1 ч с последующим охлаждением образцов до комнатной температуры в поле. После поляризации электроды соединяли накоротко и оставляли образцы в таком состоянии на 3 суток.

Пьезоэлектрические свойства определяли путем измерения пьезомодуля d_{33} статическим методом.

Точку Кюри T_C определяли по максимуму температурной зависимости диэлектрической проницаемости $\epsilon(T)$.

Рентгеноструктурные исследования проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 ($\text{Cu-K}\alpha$ -излучение, ускоряющее напряжение 40 кВ). Металлические электроды травнили кислотой HNO_3 . Доменные переориентации и структурные изменения оценивали по относительному изменению интенсивности дублетных линий.

Для микроструктурных исследований поверхность образцов подвергали механической шлифовке, полировке алмазной пастой до зеркальной степени. Травление проводили в течение 5 с в растворе $\text{HF} + \text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ (1:5:34). Микроструктуру наблюдали при помощи растрового электронного микроскопа.

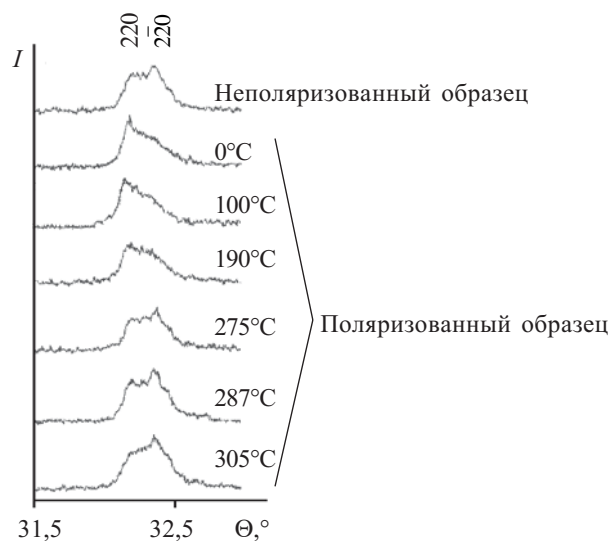


Рис. 1. Изменение интенсивности дублетных линий рентгеновского спектра после отжига исследуемых образцов при разной температуре

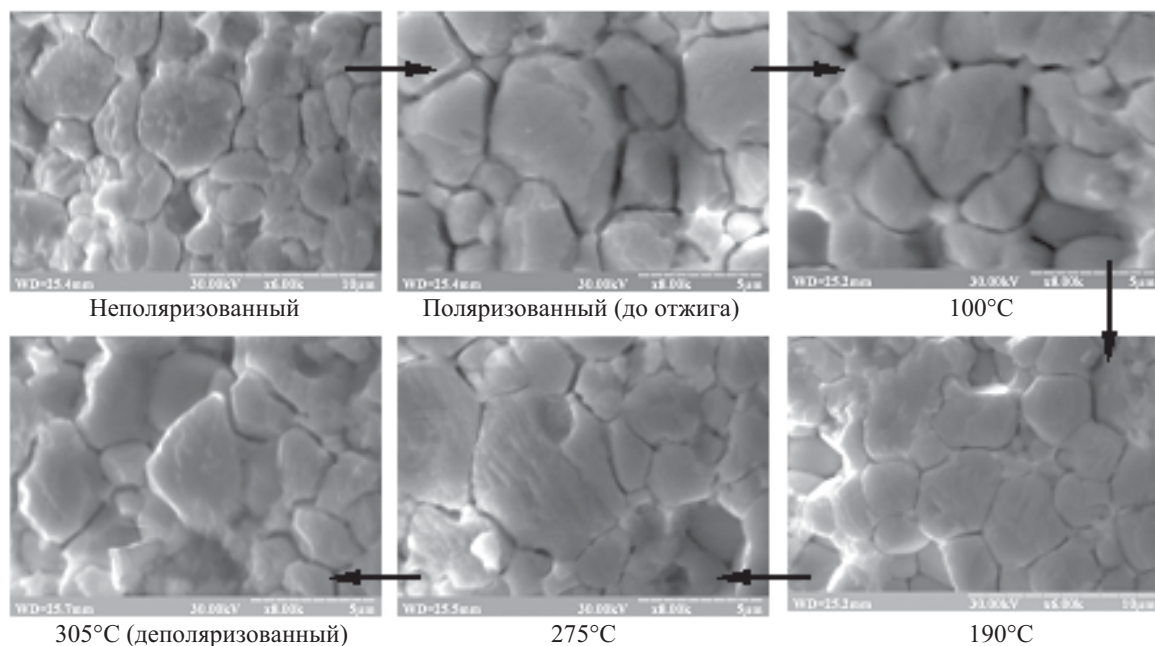


Рис. 2. Микроструктура поверхности исследуемых образцов

на SELMI РЭМ-106И (увеличение 6000 и 8000 раз) при ускоряющем напряжении 30 кВ. Для предотвращения скопления электрического заряда на поверхности на образцы напыляли углеродную пленку толщиной не более 100 нм на установке ВУП-4. Эксперимент проходил по следующей схеме: образцы отжигали при разной температуре (100, 190, 250, 275, 287 и 305°C) в течение 10 мин, спустя сутки измеряли пьезомодуль d_{33} , снимали рентгеновские спектры и наблюдали микроструктуру поверхности.

Электрическая поляризация образцов приводит к практически симметричному изменению дублетных рентгеновских линий (220) и ($\bar{2}\bar{2}0$). При отжиге поляризованных образцов происходит медленный процесс обратной перестройки доменной структуры, что проявляется в относительном изменении интенсивности дублетных линий (рис. 1).

Для исследуемого твердого раствора $T_C = 295^\circ\text{C}$. Как видно из рис. 1, процесс обратной доменной переориентации, сопровождающий деполяризацию, происходит уже при температуре 275°C ($T_{кр}$), что на 20°C ниже T_C .

Результаты исследования микроструктуры приведены на рис. 2. При травлении полированной поверхности сегнетокерамического образца, в первую очередь, происходит взаимодействие травителя с границами зерен. В объеме зерна скорость травления различна, поскольку зависит от ориентации доменов, выходящих на поверхность. Это приводит к различному контрасту границ зерен на поверхности. Зерна поляризованного образца отличаются от неполяризованного более крупными областями доменного упорядочения. При отжиге с ростом температуры происходит увеличение степени доменного разупорядочения, и при температуре 275°C этот процесс интенсифицируется. Это хорошо видно на рис. 3, где приведена

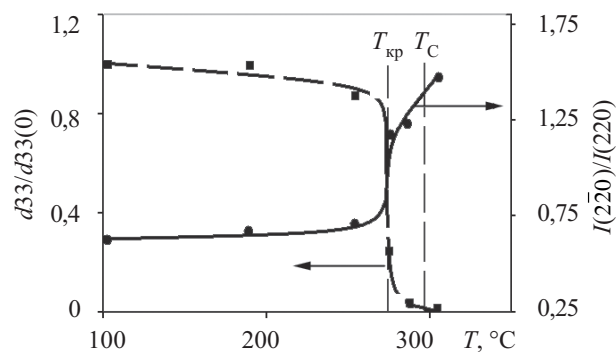


Рис. 3. Температурная зависимость относительного пьезомодуля образца и отношения интенсивностей дублетных линий

температурная зависимость перераспределения интенсивности дублетных линий (220) и ($\bar{2}\bar{2}0$). На рисунке также видно, что отжиг при температуре, близкой к критической, приводит к резкому снижению пьезоэлектрических свойств (здесь $d_{33}(0)$, d_{33} — пьезомодуль образца до отжига и после отжига в равновесном состоянии соответственно). До температуры $T_{кр}$ пьезоэлектрические свойства практически не изменяются.

Перестройка доменной структуры и резкое снижение пьезосвойств происходят в одном и том же интервале температур $T_{кр} < T < T_C$ с последующей полной деполяризацией и переходом в параэлектрическую фазу при температуре Кюри T_C .

Обсуждение результатов

В [6] было установлено, что отжиг при температуре $T_{кр}$ приводит к снижению пьезо- и диэлектрических свойств, а также к максимальной скорости релаксации образца в процессе старения после от-

жиги. На кривых температурной зависимости обратной диэлектрической проницаемости и поляризации в точке $T_{кр}$ наблюдается излом.

Проанализируем экспериментальные результаты с точки зрения стабильности доменной структуры, которая становится возможной при равенстве электрической энергии деполяризации и упругой энергии разбегания на домены (области кристалла с однородным распределением вектора поляризации).

В формировании равновесной доменной структуры большую роль играют дефекты, которые служат стопорами для движения доменных стенок, т. е. являются центрами пиннинга (т. е. закрепления) доменных стенок.

В общем случае поляризация P реальных сегнетоэлектриков является суммой спонтанной поляризации P_s , обусловленной смещением сегнетоактивного иона (решеточная поляризация), и индуцированной поляризации $P_{инд}$ вызванной наличием доменной структуры: $P = P_s + P_{инд}$, т. е. существуют две подсистемы поляризации с различным откликом на изменение термодинамических условий (в нашем случае — температуры).

При определенной критической температуре образца (для данного состава $T_{кр} = 275^\circ\text{C}$) происходит нарушение условия равновесия доменной структуры. Энергия тепловой флуктуации вектора поляризации превышает энергию закрепления доменных стенок на дефектах. В результате этого происходит разупорядочение доменной структуры, о чем свидетельствует наблюдаемое на поверхности зерна появление большего числа областей различного контраста (рис. 2), соответствующих доменам с различным направлением вектора поляризации. Одновременно с этим происходит резкое снижение пьезоэлектрических свойств в результате пьезоэлектрического зажатия доменов противоположной поляризации (рис. 3). Решеточная поляризация при этом сохраняется. Дальнейший на-

грев приводит к переходу в параэлектрическую фазу с полным исчезновением решеточной поляризации.

Нагрев образца до критической температуры 275°C эквивалентен возрастанию его тепловой энергии kT до значения $0,05$ эВ, что может являться оценочным значением энергии закрепления доменных стенок на дефектах структуры. Эта энергия на порядок ниже энергии активации точечных дефектов (в том числе и кислородных вакансий) в исследуемых соединениях.

Таким образом, экспериментально установлено, что процесс термической деполяризации сегнетокерамики состава $(\text{Pb}_{0.95}\text{Sr}_{0.05})(\text{Zr}_{0.58}\text{Ti}_{0.42})\text{O}_3$ протекает двухстадийно: в критической точке происходит разупорядочение доменной структуры, а в точке Кюри происходит переход в параэлектрическое состояние.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Струков Б. А., Леванюк А. П. Физические основы сегнетоэлектрических явлений в кристаллах. — М.: «Наука», 1983. [Strukov B. A., Levanyuk A. P. Fizicheskie osnovy segnetoelektricheskikh yavlenii v kristallakh. — Moscow. «Nauka». 1983]
2. Kungl H., Hoffmann M. J. Temperature dependence of poling strain and strain under high electric fields in LaSr-doped morphotropic PZT and its relation to changes in structural characteristics // Acta Materialia. — 2007. — N 55. — P. 5780—5791.
3. Bedoya C., Muller Ch., Baudour J.-L. et al. Sr-doped $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ ceramic: structural study and field-induced reorientation of ferroelectric domains // Materials Science and Engineering: B. — 2000. — 75. — P. 43—52.
4. Кочергин Ю. В., Бурханов А. И., Борманис К. и др. Исследование диэлектрического старения в слоистых сегнетоэлектриках // Физика твердого тела. — 2009. — Т. 51, вып. 7. — С. 1361—1363. [Kochergin Yu. V., Burkhanov A. I., Bormanis K. i dr. // Fizika tverdogo tela. 2009. Vol. 51, iss. 7. P. 1361]
5. Zhu Z. G., Li B. S., Li G. R. Microstructure and piezoelectric properties of PMS-PZT ceramics // Materials Science and Engineering: B. — 2005. — Vol. 117, Iss. 2. — P. 216—220.
6. Kuzenko D. V., Ishchuk V. M., Bazhin A. I., Spiridonov N. A. Relaxation processes in lead zirconate-titanate based piezoelectric ceramics. 2. Influence of thermal treatment // Functional Materials. — 2011. — Vol. 18, N 1. — P. 66—70.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Э. Родунер. Размерные эффекты в наноматериалах. — Москва: Техносфера, 2011. — 352 с.

Нанотехнологии, позволяющие манипулировать веществом на уровне атомов и молекул и обещающие в значительной степени изменить жизнь будущих поколений, становятся ведущим направлением развития общества в XXI столетии. На основе нанотехнологий можно создавать новые материалы, системы и устройства, которые по своим характеристикам значительно превосходят существующий уровень.

В монографии преимущественно на примере наночастиц рассмотрено проявление физико-химических свойств материалов, связанное с размерными эффектами. Основное внимание уделено структуре, электронному строению, магнитным характеристикам, каталитическим и термодинамическим особенностям. Рассматриваются также разнообразные возможности применения нанотехнологий во многих областях техники, медицины, науки и общественной жизни. Для студентов, аспирантов, научных сотрудников и разработчиков, специализирующихся в области нанотехнологий и наноматериалов.



Д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ, к. ф.-м. н. Д. М. ЁДГОРОВА,
О. А. АБДУЛХАЕВ, А. А. КАРИМОВ, Г. О. АСАНОВА

УДК 621.315.592.2:546.681"19

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

Дата поступления в редакцию
25.07 2011 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДОПУСТИМОЙ ИМПУЛЬСНОЙ МОЩНОСТИ КРЕМНИЕВОЙ p^+-p-n^+ -СТРУКТУРЫ

Показана возможность увеличения выдерживаемой прибором мощности за счет уменьшения толщины базовой области для заданной температуры нагрева и скважности импульса.

Правильный выбор режимов эксплуатации полупроводниковых приборов позволяет продлить срок их службы, предотвратить преждевременный выход из строя. Однако данные о предельных значениях тока и напряжения полупроводниковых приборов, обычно получаемые в стационарном режиме их работы, практически не содержат информации об их реальных предельных режимах эксплуатации. Особенно это касается приборов, используемых в импульсном режиме. В большинстве случаев отказы полупроводниковых приборов на основе кремния вследствие воздействия импульсов тока связаны с перегревом всей кремниевой структуры или какой-то ее части. При этом наблюдается разрушение кремниевой пластины в результате образования «шнура» тока или расплавления контактных областей [1, 2]. Для оценки правильности выбора конструктивных элементов полупроводникового прибора и оптимальных режимов его эксплуатации необходимо знать допустимую температуру активной области в режиме перегрузки, иметь данные о мощности потерь и теплоотводящих свойствах полупроводниковой структуры [3]. Это в определенной степени поможет решить проблему увеличения выдерживаемой прибором мощности. В зависимости от конструкции и типа полупроводникового прибора на основе кремния максимальная температура $p-n$ -перехода может достигать 125—150°C [4].

В настоящей работе приведены результаты исследования тепловых параметров кремниевой p^+-p-n^+ -структуры при воздействии импульсной мощности.

Исследовались кремниевые p^+-p-n^+ -структуры, в которых в качестве базовой области использовали монокристаллический кремний p -типа проводимости, легированный бором, с удельным сопротивлением 0,1 кОм·мм. Толщина базовой области в образцах составляла 250 и 500 мкм. Область p^+ -типа получена диффузией бора из боросиликатного стекла на одну сторону кристалла, а область n^+ -типа — диффузией фосфора на другую сторону. Структуры диаметром 1,5 мм напаяли на посеребренный медный корпус

цилиндрической формы с диаметром 6 мм и высотой 10,3 мм с помощью припоя ПСр-1.5 и серебряных шайб. Второй, верхний контакт — шарик диаметром 1 мм — также впаялся серебряным припоем (рис. 1, а). Вольт-амперная характеристика одной из исследованных структур приведена на рис. 1, б. В режиме прямого смещения в области напряжений от 0 до 0,5 В ток незначителен, а далее он экспоненциально увеличивается до 100 мА при 1,05 В. В режиме запирающего до -500 В обратный ток изменяется от 1 до 10 мкА.

На исследуемый диод от генератора подавали положительные прямоугольные импульсы длительно-

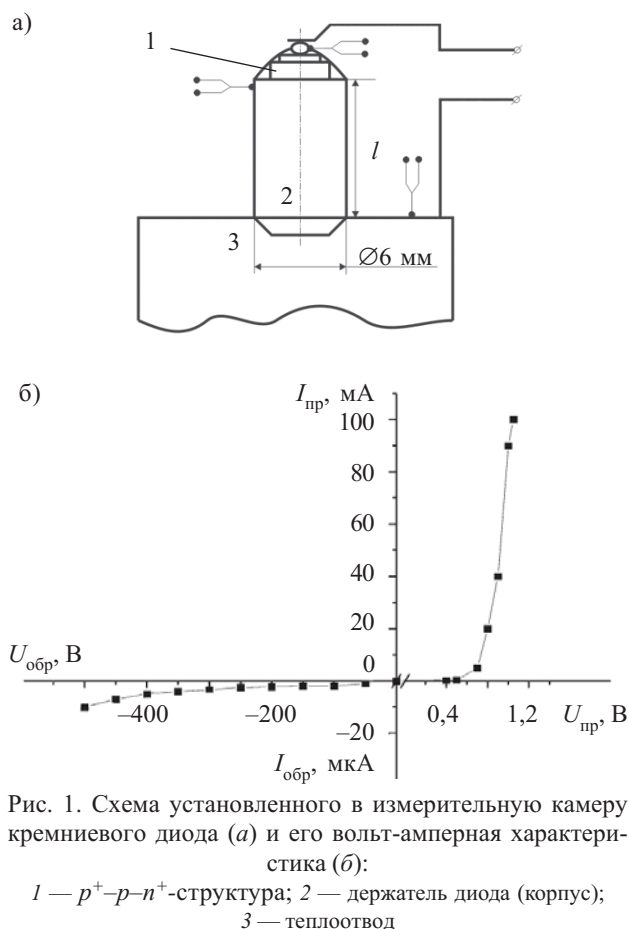


Рис. 1. Схема установленного в измерительную камеру кремниевых диода (а) и его вольт-амперная характеристика (б):

1 — p^+-p-n^+ -структура; 2 — держатель диода (корпус);
3 — теплоотвод

стью 2,5 мкс с частотами 8, 40 и 400 Гц со скважностью 50000, 10000 и 1000 соответственно. Для заданной частоты с шагом 5 кВт увеличивали мощность сигнала P до 25 кВт. Через некоторое время исследуемый диод переключали в режим измерения температуры перехода T_{p-n} , которая изначально была равна температуре камеры $T_{\text{кам}}$ (см. рис.1).

В известных методах измерения температуры $p-n$ -перехода диода или транзистора служит в качестве датчика температуры. Для этого диод предварительно калибруют. О температуре судят по падению напряжения на диоде при подаче на $p-n$ -переход в прямом направлении определенного фиксированного напряжения.

В данной работе падающее напряжение измеряли компенсационным способом. Часть падающего напряжения компенсировали от дополнительного источника тока с напряжением, равным значению падающего при исходной температуре напряжения, а разницу между ними фиксировали милливольтметром. Таким образом осуществляли прямое измерение приращения напряжения.

На рис. 2 показана зависимость величины перегрева перехода $\Delta T_{p-n} = T_{p-n} - T_{\text{кам}}$ от рассеиваемой мощности для образцов с различной толщиной h базовой области, откуда видно, что по мере увеличения P температура перехода нелинейно увеличивается. Это

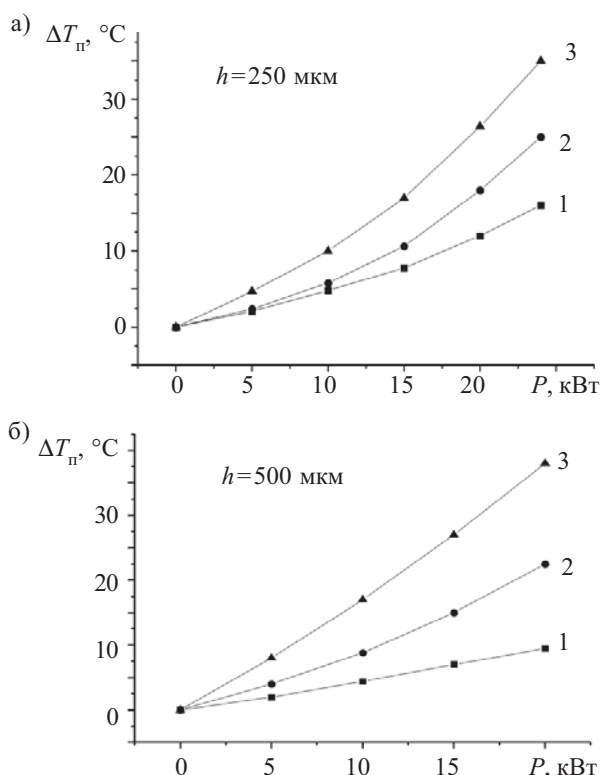


Рис. 2. Зависимость величины перегрева $p-n$ -перехода для диодов с тонкой (а) и толстой (б) базовой областью от мощности P прилагаемого импульсного сигнала различной частоты:

1 — 8 Гц; 2 — 40 Гц; 3 — 400 Гц

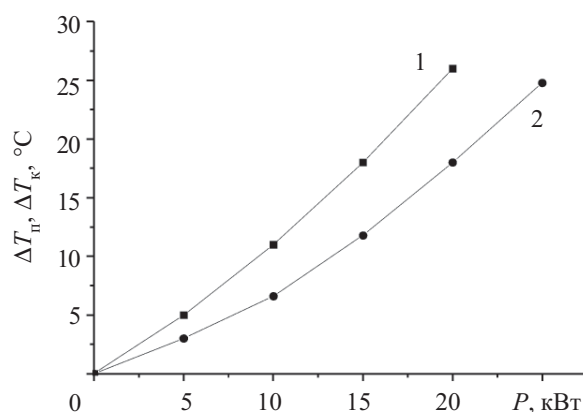


Рис. 3. Зависимость величины перегрева перехода (1) и корпуса (2) от импульсной мощности

можно объяснить неоднородностью токопрохождения, которая становится тем выше, чем выше плотность проходящего тока и чем меньше толщина базовой области. В свою очередь, чем выше плотность протекающего тока, тем больше приращение пикового значения температуры. При этом тепловое сопротивление локальных горячих областей выше, чем тепловое сопротивление всей рабочей площади диода.

Сравнение графиков на рис. 2, а и б показало, что в диоде с толстой базой зависимость приращения температуры перехода от импульсной мощности более близка к линейной, чем у диода с тонкой базой. При этом максимальные значения температуры оказываются примерно на 4°С выше, чем в образцах с тонкой базой, т. е. имеется резерв для дальнейшего увеличения подаваемой мощности [4] и тем более импульсной мощности [5]. Из рисунка также следует, что для заданной мощности импульса при низких частотах (8 и 40 Гц) перегрев перехода больше в образце с тонкой базой, а при больших частотах (400 Гц) — в образце с толстой базой. Соответственно, для работы на больших частотах предпочтительными являются структуры с тонкой базой, а на низких частотах — с толстой. Отсюда следует, что можно повысить допустимую мощность диодной p^+-p-n^+ -структуры не менее чем в полтора-два раза, если подобрать пределы утонения толщины базовой области и увеличения ее площади так, чтобы они не влияли на частотные свойства диода.

Одновременно с температурой перехода с помощью термопары также измеряли температуру корпуса $T_{\text{кор}}$, которая необходима для вычисления теплового сопротивления кремния. Как показано на рис. 3, величина перегрева корпуса ($\Delta T_{\text{к}} = T_{\text{кор}} - T_{\text{кам}}$) меньше перегрева $p-n$ -перехода и разница между ними увеличивается с повышением импульсной мощности.

Для диода, установленного в медный корпус диаметром 6 мм, были проведены экспериментально-расчетные исследования для прямоугольного импульса мощностью 360 Вт со скважностью 133, т. е. средняя рассеиваемая мощность P_p составила 2,7 Вт. Расчеты проводились для $p-n$ -структуры толщиной 250 и 500 мкм диаметром 1,5 мм при изменении длины корпуса l от 10 до 1,7 мм. Тепловые сопротивления на

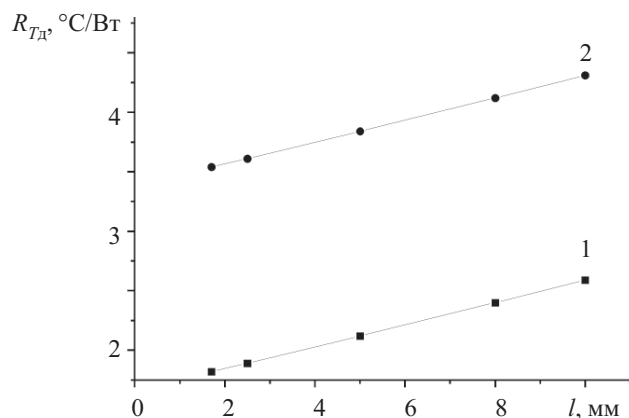


Рис. 4. Зависимость теплового сопротивления диода с тонкой (1) и толстой (2) базовой областью от длины корпуса

участках цепи определяли по формулам, приведенным в [6, с. 151—189].

Расчеты теплового сопротивления диода $R_{Тд}$ показали, что уменьшение толщины базы, так же, как и укорочение корпуса (рис. 4), приводит к уменьшению $R_{Тд}$.

Температура p - n -перехода связана с величиной рассеиваемой мощности и определяется как [7]:

$$T_{p-n} = T_{oc} + P_p R_T \quad (1)$$

где T_{oc} — температура окружающей среды; R_T — тепловое сопротивление между переходом и окружающей средой (является суммой тепловых сопротивлений между окружающей средой и базовым материалом (Si), корпусом, теплоотводом).

Исследования показали, что максимальная температура p - n -перехода, которая может быть достигнута в диоде с тонкой базой при указанных выше исходных данных, составляет 35,25°C, а в диоде с толстой базой 45,62°C.

Очевидно, что предельно допустимая мощность связана с максимально допустимой температурой p - n -перехода и, используя формулу (1), ее можно определить как

$$P_{p\max} = (T_{p-n\max} - T_{oc}) / R_T \quad (2)$$

Тогда, с учетом того, что для данной конструкции диода допустимая температура составляет 125°C [4, с. 466—469], для диода с тонкой базой была получена величина предельной мощности 16,7 Вт, а для диода с толстой базой — 10,5 Вт.

Таким образом, проведенные исследования тепловых параметров кремниевой p^+-p-n^+ -структуры при воздействии импульсного сигнала показали, что при уменьшении толщины базы пропорционально уменьшается тепловое сопротивление структуры, а зависимость перегрева p - n -перехода от импульсной мощности приближается к экспоненциальной, что увеличивает выдерживаемую мощность. Так, например, для заданной температуры перегрева уменьшение толщины базовой области от 500 до 250 мкм может значительно (до 30%) повысить допустимую мощность диодной структуры.

Полученные результаты могут представлять интерес при оптимизации тепловых режимов высокочастотных импульсных диодов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Матюхин С. И., Ставцев А. В. Моделирование нестационарных тепловых процессов и расчет допустимых токов перегрузки силовых полупроводниковых приборов // Силовая электроника. — 2011. — № 1. — С. 36—42. [Matyukhin S. I., Stavtsev A. V. // Silovaya elektronika. 2011. № 1. S. 36]
2. Гейфман Е. М., Чибуккин В. В., Гарцев Н. А., Федосим М. Е. Математическое моделирование и разработка ограничителя напряжения нового типа — высоковольтного ограничителя напряжения // Труды Средневолжского математического общества. — 2005. — Т. 7, № 1. — С. 1—2. [Geifman E. M., Chibukin V. V., Gartsev N. A., Fedosim M. E. Matematicheskoe modelirovanie i razrabotka ogranichitelya napryazheniya novogo tipa — vysokovol'tnogo ogranichitelya napryazheniya. Trudy Srednevolzhskogo matematicheskogo obshchestva. — 2005. T. 7, № 1. S. 1]
3. Потапов Ю. Тепловое моделирование // EDA EXPERT. — 2002. — Т. 73. — № 10. — С. 60—62. [Potapov Yu. // EDA EXPERT. — 2002. T. 73. № 10. S. 60]
4. Полупроводниковые приборы / Под ред. Н. Н. Горюнова. — М.: Энергоиздат, 1982. [Poluprovodnikovye pribory / Pod red. N. N. Goryunova. — M. Energoizdat. 1982]
5. Беляев А. Е., Басанец В. В., Болтовец Н. С. и др. Влияние перегрева p - n -перехода на деградацию мощных импульсных кремниевых лавинно-пролетных диодов // Физика и техника полупроводников. — 2011. — Т. 45. — Вып. 2. — С. 256—262. [Belyaev A. E., Basanets V. V., Boltovets N. S. i dr. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2011. T. 45. Vyp. 2. S. 256]
6. Николаевский И. Ф., Игумнов Д. В. Параметры и предельные режимы работы транзисторов. — М.: Сов. Радио, 1971. [Nikolaevskii I. F., Igumnov D. V. Parametry i predel'nye rezhimy raboty tranzistorov. M. Sov. Radio. 1971]
7. Parrish W. Применение приборов для поверхностного монтажа. International Rectifier. С. 1—4. valvolodin.narod.ru/articles/Ir/An/an-956.pdf.

К. т. н. В. П. КОРОТКИЙ, д. т. н. В. Н. ИЛЬИН

УДК 621.317.7+389.1 (075.8)

Беларусь, г. Минск, Институт физики им. Б. И. Степанова НАНБ
E-mail: ifanbel@ifanbel.bas-net.byДата поступления в редакцию
07.07 2011 г.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ, ИНДИФФЕРЕНТНЫЙ К ХАОТИЧЕСКОМУ ВОЗБУЖДЕНИЮ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

Предлагается схема преобразователя, не чувствительная к возникновению в ней динамического хаоса, с широкой полосой пропускания и линейной передаточной характеристикой.

Динамический хаос — распространенное, но малоизученное явление, характерное для нелинейных колебательных систем и контуров. Оно может проявляться в виде временных реализаций, напоминающих шум, при численных решениях нелинейных дифференциальных уравнений, являющихся моделями (приближениями) реальных устройств. Характер хаоса и все возможные режимы, в том числе и периодические, зависят не только от параметров модели, но и от начальных условий. Критерий возникновения динамического хаоса пока не выяснен [1].

В измерительных технологиях детерминированный хаос может представлять интерес в связи с применением активных датчиков (первичных преобразователей) в виде нелинейных колебательных контуров, активированных источниками возбуждения. На вопрос, что является исключением — упрощенные процессы, происходящие в контуре, или динамический хаос — нельзя ответить однозначно, потому что хаотических режимов в контуре бесконечно много, о чем свидетельствуют численные и натурные эксперименты [1—3]. Применение параметрического подхода (разработанного скорее для пояснения, чем для анализа принципов работы преобразователей, работающих в сугубо нелинейном режиме) для ответа на этот вопрос бессмысленно, т. к. он априори предполагает периодическое изменение параметра, а значит отсутствие хаоса.

Таким образом, уверенность в том, что параметр изменяется нужным образом и периодически, может быть обоснованной только в результате практических испытаний. Но и в этом случае необходимо знать наверняка, что датчик не работает на грани хаоса, а выбранный режим оптимален. Определению достоверных интервалов изменения параметров датчика может поспособствовать лишь его адекватная математическая модель или хотя бы информация о самом факте возможности возникновения хаоса. Как известно, шум ограничивает точность измерений, а появление хаоса может привести к невозможности их проведения.

Проблема, которая существовала всегда, но не принималась во внимание, характерна не только для датчиков в виде контуров, но и для всех сооружений, аппаратов и систем, в которых неучет интервалов изменения параметров, их совокупности и подверженности всевозможным внешним воздействиям может привести к хаосу (катастрофе). Приводимый в статье анализ, хотя и является частным решением задачи обеспечения устойчивости системы к динамическому хаосу, может быть обобщен с учетом того, что нелинейных систем и явлений значительно больше, чем моделей, их описывающих. Под обеспечением устойчивости в данном случае понимаются не меры по предотвращению возможности возникновения хаоса, а работоспособность конструкции или схемы в условиях его возникновения или существования.

В настоящей статье на примере магнитомодуляционного преобразователя показана принципиальная возможность осуществлять измерения преобразователем, который характеризуется динамическим хаосом, и разработана его модель, индифферентная ко всем возникающим и существующим в нем режимам.

Среди известных магнитомодуляционных преобразователей самым простым по исполнению является одноэлементный феррозонд [4], представляющий собой ферромагнитный сердечник (чувствительный элемент), охваченный обмотками. На одну обмотку подается гармонический ток, который периодически перемагничивает сердечник своим магнитным полем, превосходящим по величине поле насыщения сердечника. С другой обмотки снимается напряжение, по которому и судят о величине измеряемого поля.

Несмотря на простое устройство феррозонда, динамика его работы достаточно сложна для понимания и расчетов. Причиной тому являются неизбежно присутствующие емкости, шунтирующие как обмотку, с которой снимают сигнал, так и обмотку возбуждения. Емкости могут вводиться и специально для получения параметрического усиления. Как отмечается в [4, с. 65], применять феррозонд следует с осторожностью, поскольку феррорезонансная цепь возбуждения может стать источником появления ложного сигнала. Поэтому феррорезонансный режим требует тщательной проверки и устранения подобных негативных явлений. Это приводит к необходимости

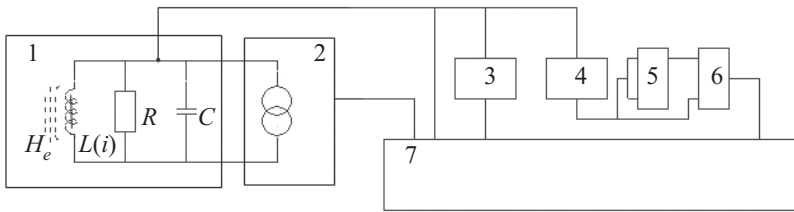


Рис. 1. Блок-схема модели феррозонда (магнитометра):

1 — сигнальная обмотка; 2 — генератор возбуждения; 3 — устройство дифференцирования; 4 — устройство интегрирования; 5, 6 — перемножители; 7 — сумматор

уточнения модели феррозонда. Будем считать, что для этого достаточно представить феррозонд нелинейным колебательным контуром с внешним возбуждением.

Блок-схема модели феррозонда представлена на **рис. 1**. Сигнальной обмоткой служит обмотка возбуждения с элементами $L(i)$, R , C , соединенными параллельно (блок 1). Параллельно этим элементам подключен генератор возбуждения 2 в виде источника тока $i(t)$. Измеряется магнитное поле с напряженностью H_e .

Для контура $L(i)$, R , C справедливо уравнение

$$C \frac{d^2 \Phi}{dt^2} + \frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt} + i_L = i, \quad (1)$$

где C — емкость контура;

Φ — магнитный поток в сердечнике катушки индуктивности $L(i)$;

i_L — ток в катушке;

R — эквивалентное сопротивление контура.

Введем обозначения:

$$\Phi_0 = I_0 L_0; \quad \frac{\Phi}{\Phi_0} = B; \quad \omega_0^2 = \frac{1}{L_0 C}; \quad \tau = \omega_0 t; \quad p = \frac{\omega}{\omega_0};$$

$$K = \frac{1}{R} \sqrt{L_0 \frac{1}{C}} = \frac{1}{RC\omega_0};$$

$$i = I_m \sin \omega t; \quad H_m = \frac{I_m}{I_0}; \quad H_L = I = \frac{i_L}{I_0},$$

где L_0 — значение индуктивности на линейном участке;

I_0 — ток, проходящий при этом через катушку;

ω_0 — резонансная частота.

Уравнение контура запишем в безразмерном виде:

$$\frac{d^2 B}{d\tau^2} + K \frac{dB}{d\tau} + B = H_m \sin p\tau. \quad (2)$$

В уравнение для его решения необходимо подставить характеристику перемангничивания. В общем случае такую характеристику для магнитного сердечника можно записать в виде полинома нечетной степени. Для нашего случая ограничимся самой простой зависимостью $H=B^3$ [3—5]. Учитывая, что в катушке индуктивности присутствует внешнее измеряемое поле (с напряженностью H_e) и поле, которое создается в сердечнике током, протекающим в обмотке (с напряженностью H_L), получим $H=H_L+H_e$. Тогда (2) окончательно запишем в виде, удобном для компьютерного моделирования:

$$\frac{d^2 B}{d\tau^2} + K \frac{dB}{d\tau} + B^3 - H_e = H_m \sin p\tau. \quad (3)$$

Следует отметить, что в случае, когда $H_e=0$, с виду простое уравнение (3) изучается на протяжении ряда лет с целью установления критерия возникновения хаоса, однако пока безрезультатно [1, 2].

В натурных и численных экспериментах хаос наблюдается в широком диапазоне значений параметров [1—3]. Решим уравнение (3) в программе MATHCAD, полагая параметры хаоса, например, следующими:

$$H_e=0, \quad H_m=12, \quad p=1, \quad K=0,005, \quad h=2\pi m/n, \\ n=500000, \quad m=100, \quad \tau=1 \dots n.$$

Результат Фурье-анализа (FV) напряжения на контуре $V=dB/d\tau$ представлен на **рис. 2**.

На хаотической спектрограмме (рис. 2, а) видны линии нечетных гармоник частоты возбуждения (1, 3, 5). Частота гармоник находится в определенных фазовых соотношениях с частотой генератора. Отметим, что Фурье-спектр FI_C емкостного тока $I_C=d^2B/d\tau^2$ визуально неотличим от спектра тока I за исключением первой гармоники. Фурье-анализ в программе MATHCAD показал, что соотношение амплитуд первых гармоник тока I и тока I_C составляет приблизительно 13:1.

Таким образом, ток возбуждения частотой первой гармоники в основном проходит через катушку индуктивности, обеспечивая тем самым эффективное ее перемангничивание. Во всем остальном спектры тока через конденсатор и катушку индуктивности визу-

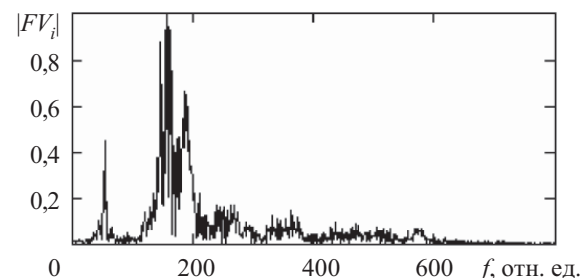
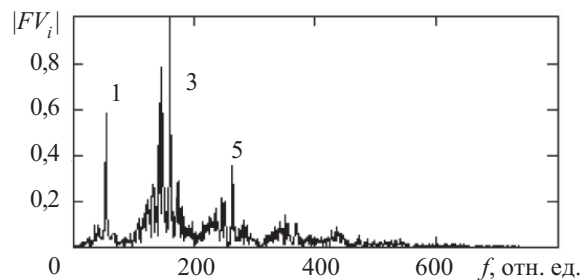


Рис. 2. Спектр напряжения в контуре в отсутствие внешнего магнитного поля (а) и при действии информационного сигнала с угловой модуляцией (б)

ально неразличимы, что позволяет говорить о резонансе хаоса.

Подадим в контур сигнал, спектр которого был бы соизмерим со спектром хаоса в контуре. Это обусловило подбор сигнала с угловой модуляцией, полосу частот которого лежит в полосе частот детерминированного хаоса. Проведя Фурье-анализ напряжения V , получим спектр FV , изображенный на рис. 2, б. Сигнал H_e оказался полностью замаскирован хаосом, Фурье-спектр более размыт, чем на рис. 2, а. Задача состоит в выделении из хаоса (т. е. измерении) сигнала H_e .

Как видно из уравнения (3), восстановить измеряемый сигнал H_e можно следующим образом.

Измерить напряжение на контуре $V=dB/dt$. Продифференцировать его (RC -цепочкой), получить сигнал d^2B/dt^2 (емкостной ток). Это же значение V проинтегрировать (RC -цепочкой), получить B , проделав масштабирование V (т. е. умножив V на коэффициент затухания контура K), получить ток через резистор (VK). Далее значение индукции B возвести в куб. Сделать это можно с помощью двух перемножителей с учетом того, что каждый из них имеет по два входа. Затем эти сигналы сложить с сигналом тока возбуждения I_p , предварительно осуществив фазировку и масштабирование всех сигналов, и получить информационный сигнал H_e .

В приводимом примере для нахождения напряженности $H(t)$ магнитного поля в нелинейной катушке индуктивности (по зависимости $H=B^3$) использовали перемножители (5, 6 на рис. 1). Известно, что в отсутствие гистерезиса зависимость $H(B)$ в общем случае может быть представлена и более сложной функцией в виде полинома нечетной степени

$$H=aB+cB^3+dB^5+\dots$$

Это не меняет сути метода, но усложняет схему, т. к. в этом случае придется увеличить число перемножителей, соединяя их определенным образом, а также применить сумматор, имеющий большее число масштабируемых входов.

В магнитометре, схема которого приведена на рис. 1, сигнал, аналогичный току через конденсатор, получается в результате дифференцирования устройством 3 напряжения на контуре, продифференциро-

ванное напряжение подается на вход сумматора 7. На остальные входы сумматора поступают: напряжение с контура и напряжение, проинтегрированное блоком 4 после возведения его в куб перемножителями 5 и 6, а также сигнал тока возбуждения с генератора 2. Сигналы масштабируются, складываются, и на выход сумматора 7 поступает измеряемый сигнал H_e , изображенный на рис. 3. Следует отметить, что схема по своей структуре напоминает схему магнитометра на феррозонде с синхронным детектированием второй гармоники частоты тока возбуждения, амплитуда которой изменяется в соответствии с измеряемым полем.

Выводы

Таким образом, доказана возможность работы измерительных преобразователей, основанных на существенно нелинейных эффектах, в режиме динамического хаоса.

Показано, что при работе магнитного модулятора как в режиме молчания, так и в режиме воздействия информационного сигнала, может наблюдаться детерминированный хаос. Модуляция рассматривается как совместный результат сложного воздействия на модулятор информационного сигнала и гармонического сигнала возбуждения.

Преимущества предлагаемого решения в том, что преобразователь не предъявляет требований к стабильности генератора возбуждения, обладает линейной передаточной характеристикой и широкой полосой пропускания, которая не ограничивается резонансными явлениями в контуре датчика.

Для создания магнитометра достаточно знать лишь кривую перемагничивания и решать при этом основную задачу — определение свойств нелинейной среды (материала датчика), которая является ключевой. Нужная кривая перемагничивания может быть получена в результате применения сердечника из специальных материалов с учетом его геометрических размеров. При этом нестабильность кривой перемагничивания в некоторых пределах допустима и не приводит к резкому изменению погрешности измерения.

Преобразователь может найти применение в качестве магнитной антенны для приема магнитной составляющей электромагнитного поля в радиочастотном диапазоне, анализаторах спектра магнитных шумов, для определения формы магнитных импульсов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Мун Ф. Хаотические колебания. — М.: Мир, 1990. [Mun F. Khaoticheskie kolebaniya. M. Mir. 1990]
2. Кузнецов С. П. Динамический хаос. — М.: Наука, 2000. [Kuznetsov S. P. Dinamicheskii kaos. M. Nauk. 2000]
3. Короткий В. П. Детерминированный хаос в модели колебательного контура с нелинейной индуктивностью // Нелинейный мир. — 2010. — № 12. — С. 758—763 [Kortkii V. P. // Nelineinyi mir. 2010. № 12. P. 578]
4. Афанасьев Ю. В. Феррозондовые приборы. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. [Afanas'ev Yu. V. Ferrozondovye pribory. L. Energoatomizdat. 1986]

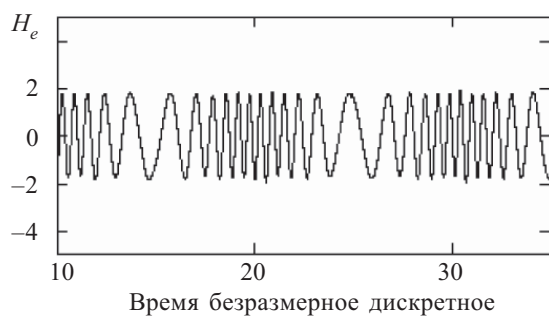


Рис. 3. Измеряемый сигнал

К. т. н. В. И. ЧАСНЫК

УДК 622.3.032.266

Украина, г. Киев, НИИ «Орион»
E-mail: ndiorion@tsua.netДата поступления в редакцию
024.02 2011 г.

ФОКУСИРОВКА ИНТЕНСИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ В СПИРАЛЬНОЙ ЛБВ С МПФС С НЕСИНУСОИДАЛЬНЫМ ПОЛЕМ

Показана возможность использования МПФС с несинусоидальным полем для фокусировки электронных потоков в высоковольтных ЛБВ при достаточных для практики уровнях токопрохождения пучка на коллектор ЛБВ

Интерес разработчиков мощных спиральных ЛБВ к применению в них для фокусировки интенсивных электронных пучков магнитной периодической фокусирующей системы (МПФС) с несинусоидальным распределением магнитной индукции вызван тем, что ее использование позволяет не только фокусировать интенсивные электронные потоки в ЛБВ [1—6], но и значительно повысить устойчивость работы спиральной высоковольтной ЛБВ к самовозбуждению на обратной волне [7].

В [4] рассмотрены оптимальные условия согласования электронного пучка с магнитным полем МПФС, содержащим высшие гармонические составляющие магнитной индукции (3-я и 5-я гармоники), и приведены расчеты по влиянию отклонений параметров пучка и переходной области от оптимальных на величину пульсаций электронного пучка. Однако, несмотря на эти расчеты, при практическом использовании МПФС с несинусоидальным полем для фокусировки пучка в спиральной ЛБВ не удалось получить хорошее токопрохождение на коллектор при параметре магнитного поля $\alpha \geq 1,0$. В случае же когда $\alpha > 1,25$, токопрохождение не превышало 25% для рассмотренных распределений поля и периодов МПФС [3]. Отсутствие хорошего токопрохождения в высших областях устойчивого формирования электронного потока авторы объяснили сильным влиянием неоднородностей фокусирующей системы. Вместе с тем, известно, что при вводе пучка с радиальной составляющей скорости пульсации увеличиваются и значительно уменьшается устойчивость формирования при больших α . Поэтому при работе в высших областях устойчивости согласованию электронной пушки с полем и обеспечению ламинарности пучка в пушке должно уделяться особое внимание [2].

В [2, 4] проведены теоретические расчеты по определению влияния величины индукции магнитного поля в первой магнитной линзе МПФС на токопрохождение [4] и на величину пульсации границы электронного пучка [2]. Эти расчеты показали существенное

влияние магнитной индукции в первой линзе МПФС как на прохождение, так и на контур электронного пучка во второй области устойчивости. Кроме того, в [4] подчеркивается, что устойчивость фокусировки при увеличении переходной области, как правило, возрастает, а это означает увеличение роли магнитного поля на входе МПФС в формировании пучка в переходной области.

В настоящей работе было экспериментально исследовано влияние величины магнитной индукции в первой линзе МПФС на токопрохождение интенсивных электронных пучков в спиральных ЛБВ с МПФС с несинусоидальным распределением магнитной индукции с периодами и уровнями фокусирующего магнитного поля, при которых $\alpha > 1,0$.

Оптимальные значения амплитуд третьей и пятой гармоник осевого распределения магнитной индукции в МПФС с несинусоидальным полем

Как известно [1], первая область неустойчивой фокусировки электронного потока отсутствует при условии распределения магнитной индукции в виде

$$B_z(z) = B_{z1} \left(\cos \frac{2\pi}{L} z - 0,5 \cos \frac{6\pi}{L} z \right), \quad (1)$$

где L — период МПФС;

B_{z1} — амплитуда первой гармоники поля.

Распределение магнитной индукции в соответствии с выражением (1) создается за счет шунтирующего кольца толщиной g_1 , которое располагается в зазоре величиной g между полюсными наконечниками магнитной системы. Расчет МПФС, у которой внутренний диаметр шунтирующего кольца равен диаметру отверстия в полюсном наконечнике d , приведен в [8].

Типичное распределение продольной составляющей магнитной индукции на оси МПФС с несинусоидальным полем представлено на рис. 1, где показана величина магнитной индукции на входе МПФС ($B_{z\text{вх}}$), а также ее максимальное и минимальное значения ($B_{z\text{max}}$ и $B_{z\text{min}}$).

Как показывает гармонический анализ распределения магнитной индукции на оси таких систем, при выполнении условия $B_{z3}/B_{z1} = 0,5$ в большинстве случаев в распределении магнитного поля присутствует отрицательная пятая гармоника довольно высокого уровня. Поэтому в данной работе рассматривались

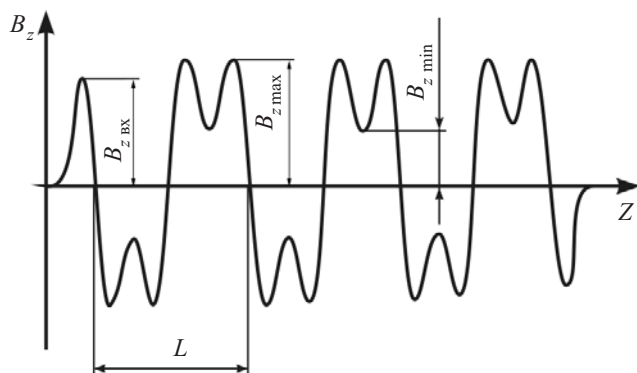


Рис. 1. Распределение магнитной индукции на оси МПФС с несинусоидальным полем

МПФС с несинусоидальным полем, у которых в распределении осевой компоненты магнитной индукции присутствует первая, третья и пятая гармоники поля:

$$B_z(z) = B_{z1} \left(\cos \frac{2\pi}{L} z - a_3 \cos \frac{6\pi}{L} z - a_5 \cos \frac{10\pi}{L} z \right), \quad (2)$$

где $a_3 = B_{z3}/B_{z1}$; $a_5 = B_{z5}/B_{z1}$ (здесь и далее a_i — относительная амплитуда i -й гармоники магнитного поля)

Спектр гармоник поля является одним из основных факторов, существенно влияющих на устойчивость интенсивных электронных потоков в поле МПФС [6]. При определенных соотношениях между третьей и пятой гармониками поля появляются дополнительные зоны неустойчивости, изменяются границы зон устойчивости и неустойчивости.

Известно, что первая область неустойчивости отсутствует, когда коэффициент θ_2 [5] равен нулю:

$$\theta_2 = \alpha(0,5 + a_3 + a_3 a_5 + a_5 a_7 + a_7 a_9). \quad (3)$$

Здесь параметр магнитного поля α вычисляется по формуле

$$\alpha = 2,78 \cdot 10^8 L^2 B_{z1}^2 / U_0,$$

где U_0 — ускоряющее напряжение.

Следует отметить, что при определении численных значений параметра α , а также других, вычисляемых в статье, использовалась система СИ.

Уровень третьей гармоники определяется в основном длиной шунтирующего кольца g_1 , а уровень пятой гармоники зависит от соотношения размеров d/L и g/L . С уменьшением зазора g между полюсными наконечниками, амплитуда отрицательной пятой гармоники возрастает особенно сильно в области значений $d/L < 0,15$. Так, например, при $g_1/L = 0,145$ (обеспечивающем $a_3 = -0,5$), $d/L = 0,1$ и $g/L = 0,3$ имеем $a_5 = -0,57$, т. е. уровень пятой гармоники больше, чем третьей. Соответственно увеличивается коэффициент θ_2 : $\theta_2 = 0,254$ при $\alpha = 1,0$, что уже может оказать заметное влияние на границы зон устойчивости.

Уровни седьмой и девятой гармоник магнитного поля, рассчитанные в области значений $g/L \geq 0,35$ и $d/L > 0,15$, на порядок меньше, чем уровни третьей и пятой гармоник. Поэтому произведениями $a_5 a_7$ и $a_7 a_9$ в выражении (3) можно пренебречь как величинами второго порядка малости. С учетом этого выражение для коэффициента θ_2 примет вид

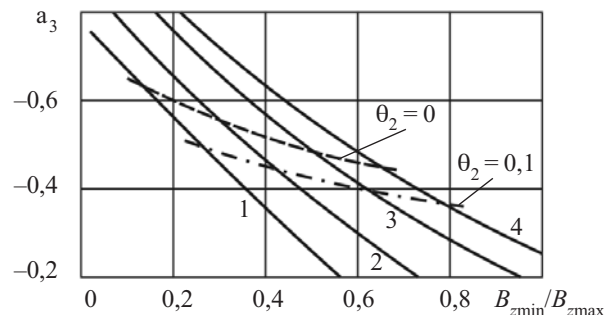


Рис. 2. Зависимость амплитуды третьей гармоники магнитной индукции от отношения B_{zmin}/B_{zmax} в МПФС с несинусоидальным полем для разных значений пятой гармоники: 1 — $a_5 = -0,2$; 2 — $a_5 = -0,1$; 3 — $a_5 = 0$; 4 — $a_5 = 0,1$

$$\theta_2 = \alpha(0,5 + a_3 + a_3 a_5). \quad (4)$$

Наилучшие условия фокусировки электронного потока (при которых отсутствует первая область неустойчивости) обеспечиваются при оптимальном значении θ_2 , равном 0. На рис. 2, где приведены зависимости $a_3 = f(B_{zmin}/B_{zmax})$, приведена также штриховая кривая, в каждой точке которой уровни третьей и пятой гармоник поля таковы, что $\theta_2 = 0$ в соответствии с соотношением (4).

Анализ зависимостей, представленных на рис. 2, позволяет сделать следующий вывод: чтобы находиться в области устойчивой фокусировки электронного потока необходимо, чтобы с ростом амплитуды отрицательной пятой гармоники a_5 от 0 до 0,2 соответственно возрастал и уровень отрицательной третьей гармоники a_3 от 0,5 до 0,65. Следует отметить, что такая зависимость между амплитудами третьей и пятой гармоник магнитного поля сохраняется и при значениях коэффициента θ_2 , несколько отличающихся от оптимального, например когда $\theta_2 = 0,1$ (штрихпунктирная кривая на рис. 2).

Таким образом, при наличии пятой гармоники поля, как положительной, так и отрицательной, расширяется диапазон возможных геометрических размеров полюсных наконечников и шунтирующих колец, при которых отсутствует первая область неустойчивости. Следует отметить, что этот диапазон максимален для МПФС с несинусоидальным полем, у которых $g/L > 0,4$. Так, например, для $a_3 = -0,5$ и $\alpha = 1,0$ при $g/L = 0,45$ коэффициент $\theta_2 = 0$ для любого значения отношения g/L в интервале от 0,01 до 0,38, а при $g/L = 0,4$ коэффициент $\theta_2 < 0,05$ в интервале $0,15 < d/L < 0,35$.

Однако при проектировании ЛБВ в целом не всегда возможно в МПФС с несинусоидальным полем выполнить условие $g/L > 0,4$ по конструктивным соображениям, а при $g/L < 0,35$ практически невозможно выбрать такие размеры шунтирующего кольца и полюсных наконечников МПФС, которые обеспечивали бы оптимальные условия устойчивости пучка. Поэтому при разработке МПФС с несинусоидальным полем представляет практический интерес определение возможных отклонений коэффициента θ_2 от оптимального, т. е. значения $\theta_2 \neq 0$, при которых можно сформировать мощный электронный пучок и получить приемлемое токопрохождение на коллектор ЛБВ. Рассмотрим пути решения этой задачи.

Результаты экспериментального исследования

Экспериментальное исследование токопрохождения в МПФС с несинусоидальным распределением магнитной индукции в статическом режиме работы проводилось на макете прибора и на мощных импульсных ЛБВ в динамическом режиме.

Одним из основных требований, предъявляемых к мощным импульсным ЛБВ, является наличие низковольтного управления электронным потоком. Поэтому при проведении эксперимента использовалась электронная пушка с сеточным управлением. Оптика электронной пушки приведена в [9, рис. 1]. Электронная пушка имела первеанс около $0,9 \cdot 10^{-6} \text{ А/В}^{3/2}$, диаметр пучка на входе МПФС — 1,0 мм. Измерения проводились в импульсном режиме с длительностью импульса 10 мкс в вакууме $(1-3) \cdot 10^{-7}$ Торр.

Макет прибора состоит из корпуса, в котором устанавливается электронная пушка, баллона из немагнитного материала и коллектора, расположенного на изоляторе в баллоне. Пролетный канал статического макета образуется набором медных втулок, размещенных внутри баллона. Длина пролетного канала составляет 100 мм при его диаметре 1,7 мм. МПФС, закрепленная в оправке, одевается на баллон макета без его разгерметизации и в процессе эксперимента может перемещаться вдоль оси макета. Такая конструкция макета и МПФС позволяла изменять расстояние от анода пушки до входа в МПФС, изменять амплитуду магнитной индукции в первой линзе МПФС, не меняя распределение магнитного поля в регулярной части МПФС. При фиксированном положении МПФС определялось управляющее напряжение на сетке электронной пушки, обеспечивающее наилучшее токопрохождение пучка на коллектор. Коэффициент токопрохождения определялся как

$$\chi = [I_{\text{кол}} / (I_{\text{кол}} + I_{\text{ос}})] \cdot 100\%,$$

где $I_{\text{кол}}$ — ток коллектора;

$I_{\text{ос}}$ — ток оседания в пролетном канале макета или спиральной ЛБВ с тем же диаметром пролетного канала (1,7 мм).

Для уменьшения краевых эффектов в рассматриваемой МПФС осевой размер крайних магнитов был выбран равным четвертой части периода. Концевые полюсные наконечники МПФС (первый и последний) размещаются в плоскостях симметрии, где индукция на оси пролетного канала минимальна (B_{zmin}) или, по терминологии [2], находится в «провале» магнитного поля. Кроме того, концевые полюсные наконечники закорачиваются на экран, т. е. одновременно являются деталями экрана и магнитной системы. Все эти особенности рассматриваемой МПФС позволяют значительно уменьшить падение индукции на краях системы.

Параметры трех исследуемых МПФС приведены в табл. 1, где $\beta = 3,84 \cdot 10^2 L^2 \cdot \Pi_{\text{п}} / r_{\text{вх}}^2$ — параметр пространственного заряда, $\Pi_{\text{п}} = I_0 / U_0^{3/2}$ — первеанс, I_0 — полный ток пучка. Указанные в таблице значения E получены из выражения $E = (B_{\text{zвх}} / B_{\text{z1}})^2$, такого же, как и в [2], для возможности сопоставления экспериментальных результатов, полученных в настоящей

Параметры исследуемых МПФС

№ п/п	L , мм	$B_{\text{zвх}}$, Тл	B_{z1} , Тл	$-a_3$	$-a_5$	E	β
1	22,4	0,32	0,32	0,44	0,12	1,0	0,7
2	26	0,265	0,265	0,45	0,18	1,0	0,9
3	30	0,29	0,29	0,48	0,17	1,0	1,1

работе, с теоретическими расчетами, выполненными в [2].

Из приведенных на рис. 3 экспериментальных зависимостей видно, что с уменьшением магнитного поля в первой линзе оптимум коэффициента токопрохождения смещается к большим значениям α , которым соответствуют меньшие ускоряющие напряжения. Так, $\chi > 85\%$ для $E=0,64$ в интервале $1,6 < \alpha < 1,95$ ($U_0=10-12$ кВ). Кроме того, существует область значений параметра магнитного поля, в которой коэффициент токопрохождения слабо зависит от величины магнитной индукции в первой линзе МПФС. Так, $\chi \geq 83\%$ при $1,55 < \alpha < 1,65$ ($U_0=11,8-12,5$ кВ) и любых E в интервале от 0,64 до 1,07.

На рис. 4 приведена зависимость максимального радиуса пучка ρ_{max} от параметра α , построенная на основании данных [2, рис. 9, а]. Анализ зависимостей, приведенных на рис. 3 и 4, показывает, что ход экспериментальных кривых $\chi = f(\alpha)$ для $E=1,07$ и $E=0,64$ довольно хорошо согласуется качественно с расчетными кривыми $\rho_{\text{max}} = f(\alpha)$ для $E=1,0$ и $E=0,6$ во всем исследованном интервале α . Так, например, при уменьшенном поле в первой линзе и $\alpha > 1,6$ начинаются зоны наилучшего токопрохождения ($\chi=86\%$) и наименьших пульсаций границы пучка. Также, в

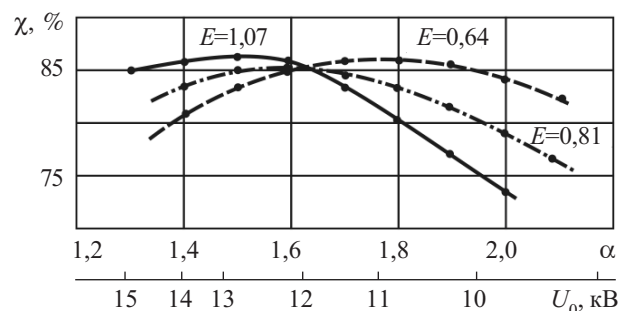


Рис. 3. Зависимость коэффициента χ от параметра α для различных амплитуд E в первой линзе МПФС с периодом 30 мм при $a_3 = -0,46$, $a_5 = -0,19$, $\beta = 1,1$

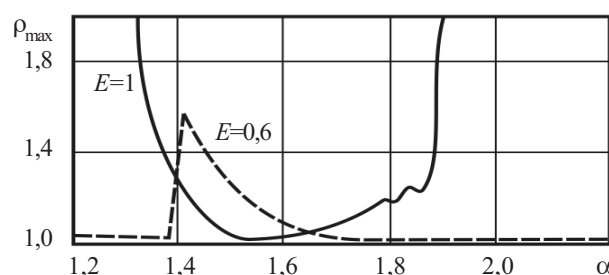


Рис. 4. Зависимость ρ_{max} от параметра α для различных амплитуд E при $a_3 = -0,45$, $a_5 = 0$, $\beta = 0,6$ (для случая ввода пучка в «провал» поля [2])

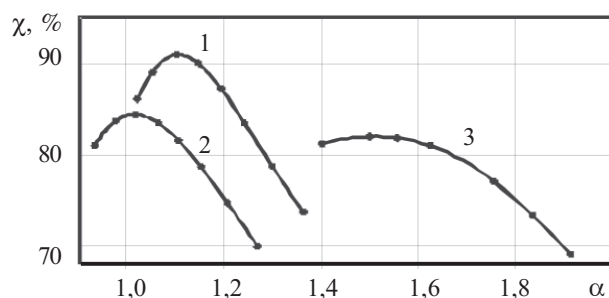


Рис. 5. Зависимость коэффициента χ от параметра α для различных периодов МПФС (номера кривых соответствуют номерам МПФС в табл. 1):

1 — 22,4 мм; 2 — 26 мм; 3 — 30 мм

интервале значений $1,6 < \alpha < 1,7$ наблюдается наилучшее токопрохождение, а $\rho_{\max} < 1,08$ для $0,6 < E < 1,0$.

Проведенные исследования показали, что улучшение согласования МПФС с электронной пушкой за счет изменения амплитуды магнитного поля в первой линзе магнитной системы и других параметров МПФС с периодом 30 мм привело к увеличению токопрохождения электронного пучка, которое максимально в диапазоне $1,4 < \alpha < 1,6$ (рис. 5). Вместе с тем, следует заметить, что уменьшение поля в первой линзе целесообразно только в том случае, когда можно обеспечить запас по величине магнитной индукции [2].

В результате проведенных исследований по токопрохождению в статическом режиме макета МПФС с несинусоидальным полем были определены условия, обеспечивающие наилучшее согласование магнитной системы с электронной пушкой, экранированной от магнитного поля. С учетом этих исследований, с каждой МПФС были собраны и испытаны спиральные ЛБВ с током катода $I_{\text{кат}} = 1,2—1,3$ А, $U_0 = 12,0—14,0$ кВ, диаметром спирали 1,7 мм, длиной пролетного канала 95 мм.

Результаты измерений приведены в табл. 2. Амплитуда магнитного поля в первой линзе магнитного поля для всех трех МПФС равнялась амплитуде первой гармоники магнитной индукции.

Как и при статических испытаниях на макете прибора, самое высокое токопрохождение в динамическом режиме $\chi = 87\%$ наблюдалось в ЛБВ с МПФС с периодом 22,4 мм при величине параметра магнитного поля $\alpha \approx 1,1$. Из анализа результатов токопрохождения в ЛБВ с периодами МПФС 26 и 30 мм можно сделать вывод, что при практически одинаковых уровнях третьей и пятой гармоник и близкими значениями коэффициента θ_2 фокусировка интенсивных элек-

тронных потоков во второй полосе устойчивости ($\alpha > 1,4$) более чувствительна к отклонениям условий от оптимальных, чем в первой полосе устойчивости (при $\alpha < 1,2$).

Таким образом, экспериментально установлено, что при использовании электронной пушки с сеткой для формирования электронного пучка в спиральной ЛБВ с МПФС с несинусоидальным полем при $1,0 < \alpha < 1,2$ коэффициент токопрохождения в статическом режиме работы ЛБВ составляет 85—91% и 78—85% в динамическом, а при значениях $\alpha > 1,4$, соответствующих второй области устойчивости, коэффициент токопрохождения достигает 82% в статике и 75% в динамике.

Проведенные экспериментальные исследования показали возможность использования МПФС с несинусоидальным полем для фокусировки электронных потоков в высоковольтных ЛБВ при достаточных для практики уровнях токопрохождения пучка на коллектор ЛБВ.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Данович И. А. Анализ фокусировки и устойчивости интенсивных пучков в периодических магнитных полях // Изв. вузов. Радиофизика. — 1966. — № 2. — С. 351—361. [Danovich I. A. // Izv. vuzov. Radiofizika. 1966. N 2. P. 351]
2. Данович И. А., Кожушный В. А. Особенности формирования электронных потоков периодическими магнитными полями в неоптимальных режимах // Известия вузов СССР. Радиоэлектроника. — 1971. — Т. XIV, № 9. — С. 1085—1094. [Danovich I. A., Kozhushnyi V. A. // Izvestiya vuzov SSSR. Radioelektronika. 1971. Vol. XIV, N 9. P. 1085]
3. Бахрах Л. Э., Мурзин В. В., Беляев В. К. Исследование фокусировки электронных пучков МПФС с негармоническим распределением поля // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. — 1978. — Вып. 10. — С. 39—46. [Bakhrakh L. E., Murzin V. V., Belyaev V. K. // Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. Elektronika SVCh. 1978. Iss. 10. P. 39]
4. Бахрах Л. Э., Газукин В. А., Мурзин В. В. Формирование электронных пучков в переходной области МПФС с негармоническим распределением поля // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. — 1978. — Вып. 11. — С. 60—66. [Bakhrakh L. E., Gazukin V. A., Murzin V. V. // Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. Elektronika SVCh. 1978. Iss. 11. P. 60]
5. Данович И. А. Формирование электронных потоков периодическими магнитными полями с несинусоидальным осевым законом распределения индукции. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. — 1966. — Вып. 9. — С. 20—29. [Danovich I. A. // Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. Elektronika SVCh. 1966. Iss. 9. P. 20]
6. Голеницкий И. И. Устойчивость интенсивных электронных потоков в МПФС с несинусоидальным распределением магнитного поля. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. — 1990. — Вып. 5. — С. 38—43. [Golenitskii I. I. // Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. Elektronika SVCh. 1990. Iss. 5. P. 38]
7. Часнык В. И. Устойчивость к самовозбуждению на обратной волне спиральной ЛБВ с МПФС с несинусоидальным полем // Техника и приборы СВЧ. — 2009. — № 2. — С. 3—7. [Chasnyk V. I. // Tekhnika i pribory SVCh. 2009. N 2. P. 3]
8. Данович И. А., Митус А. Ф. Расчет и моделирование периодических магнитных систем приборов СВЧ // Известия вузов СССР. Радиоэлектроника. — 1972. — Т. XV, № 8. — С. 969—976. [Danovich I. A., Mitus A. F. // Izvestiya vuzov SSSR. Radioelektronika. 1972. Vol. XV, N 8. P. 969]
9. Ищенко А. И., Лось В. С., Паничевский В. А., Часнык В. И. Разработка ЭОС с высокой компрессией и низковольтным управлением электронным потоком // Тез. докл. ... «Периодическая, электростатическая и магнитная фокусировка электронных пучков». — М.: ЦНИИ «Электроника», 1973. Сер. 1. Электроника СВЧ. — Вып. 1 (13). — С. 37—39. [Ishchenko A. I., Los' V. S., Panichevskii V. A., Chasnyk V. I. // Tez. dokl. ... «Periodicheskaya, elektrostaticheskaya i magnitnaya fokusirovka elektronnykh puchkov». Ser. 1. Elektronika SVCh. Moscow. TsNII «Elektronika», 1973. Iss. 1 (13). P. 37]

Таблица 2

Величина токопрохождения в ЛБВ с МПФС с несинусоидальным полем в статическом и динамическом режимах

№ п/п	L, мм	θ_2	Статический режим			Динамический режим
			α	U_0 , кВ	χ , %	
1	22,4	0,12	1,1	12,8	91	87
2	26	0,14	1,05	12,8	85	78
3	30	0,15	1,53	13,8	82	75

Украина, г. Киев, НИИ «Орион»
E-mail: orion@ri-orion.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
21.11 2011 г.

ПЕРСПЕКТИВНАЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННАЯ АППАРАТУРА

Представлены современные аппаратные средства организации радиосвязи на основе радиолиний диапазона миллиметровых волн.

Диапазон миллиметровых волн (ММВ) представляет значительный интерес для создания современной радиоэлектронной аппаратуры различного функционального назначения. Низкий уровень собственных помех в этом диапазоне, возможность обеспечения экологической чистоты (работа с малыми уровнями выходной мощности), трудность организации радиопротиводействия — совокупность этих свойств при условии реализации приемлемой стоимости и доступности на рынке обуславливает перспективность широкого использования техники миллиметрового диапазона длин волн.

Развитие современной телекоммуникационной аппаратуры характеризуется стремлением к увеличению скорости передачи и пропускной способности, что достигается только при расширении полосы частот, а достаточная для этого широкополосность достижима только в диапазоне миллиметровых волн. В то же время значительно возрастает плотность загрузки лицензионных участков традиционного радиочастотного диапазона (2—20 ГГц). Все это заставляет обратиться к использованию других, более высокочастотных участков частотного спектра. Это, в частности, диапазон миллиметровых волн (30—200 ГГц), в котором можно разместить большее количество каналов связи при таком же значении относительной полосы частот.

Цифровые радиолинии диапазона ММВ в последние годы широко используются в качестве недорогого средства связи между отдельными сотовыми и базовыми станциями. По сравнению с традиционными телекоммуникационными проводными системами, а также волоконно-оптическими технологиями системы радиосвязи имеют неоспоримое преимущество в отношении стоимости, особенно в сельской местности и в районах устоявшейся городской застройки. Системы организации связи на основе радиолиний быстрее устанавливаются, быстрее окупаются и позволяют легче подстраиваться под запросы абонентов. К несомненным достоинствам радиолиний диапазона ММВ следует отнести высокую надежность и хорошее качество каналов связи, большие объемы

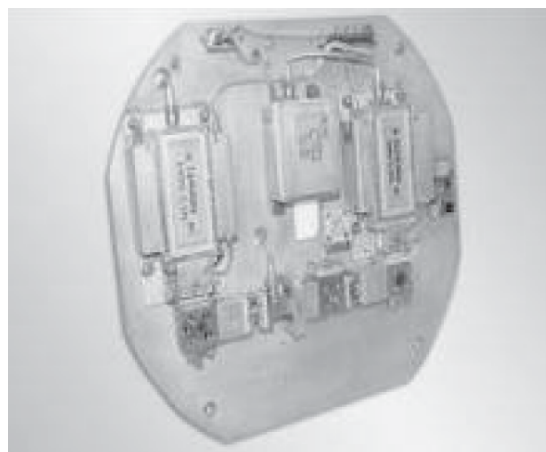
передаваемой информации, малую мощность передающих устройств и, как следствие, менее напряженную электромагнитную обстановку по сравнению с радиолиниями более низкочастотных диапазонов.

В настоящее время унифицированный частотный план США и европейских стран содержит полосу частот шириной 13 ГГц. Предназначенные для широкополосной фиксированной наземной беспроводной связи, диапазоны частот 40,5—43,5 ГГц, 71—76 ГГц, 81—86 ГГц и 92—95 ГГц открывают перед операторами прекрасные возможности по применению радиолиний миллиметрового диапазона волн с гигабитными скоростями обмена данными (до 10 Гбит/с). При этом на одной и той же территории в этих диапазонах одновременно может работать множество операторов, и их радиолинии совершенно не будут мешать друг другу, поскольку в этих диапазонах частот вероятность возникновения помехи из-за переотражения от различных препятствий в городских условиях практически отсутствует.

В течение ряда лет специалистами НИИ «Орион» на собственной полупроводниковой технологической базе разработаны приемопередающие модули (ППМ) для малогабаритных цифровых радиорелейных станций, работающих в частотных диапазонах 42, 60 и 94 ГГц с высокой скоростью передачи информации. Эти станции обеспечивают передачу больших информационных потоков в новых перспективных диапазонах длин волн, что позволяет повысить эффективность связи, производства и управления за счет оперативного доступа к большим массивам информации при минимальном воздействии на окружающую среду.



Радиорелейная станция диапазона 40,5—43,5 ГГц



Приемопередающий модуль для радиорелейной станции W-диапазона

Основные электрические параметры приемопередающего модуля

Наименование параметра, единица измерения	Типичные значения
Несущая частота передатчика, $F_{\text{пер.}}$, ГГц	92,37—94,63
Дуплексный разнос частот, ГГц	2,260
Выходная импульсная мощность СВЧ, мВт, не менее	50
Вид модуляции	AM 100%
Относительная нестабильность несущей частоты	$3 \cdot 10^{-4}$
Входная импульсная мощность СВЧ, соответствующая BER^{-6} , дБ·Вт	−90
Средняя номинальная скважность	2
Сопротивление нагрузки информационного входа, Ом	100 (3,3V CMOS)
Сопротивление нагрузки выходного информационного сигнала, Ом	100 (3,3V CMOS)
Рабочая частота приемника, $F_{\text{пр.}}$, ГГц	92,37—94,63
Промежуточная частота, $F_{\text{пч}}$, ГГц	2,260
Рабочая частота гетеродина, $F_{\text{гет.}}$, ГГц	92,37—94,63
Относительная нестабильность частоты гетеродина	$3 \cdot 10^{-4}$
Сквозная полоса частот, ГГц	$F_{\text{пч}} \pm 0,150$
Коэффициент шума, дБ, не более	11
Подавление зеркального канала, дБ, не менее	70
Масса устройства, кг, не более	2,5
Габаритные размеры, мм, не более	Ø 262; высота 65
Тип присоединительного волноводного фланца — согласно ГОСТ 13317-89 или UG-387/U	

Разработанные в НИИ «Орион» ППМ являются функционально законченными модулями дуплексной связи и надежно функционируют в интервале рабочих температур от 0 до 70°C.

В частности, приемопередающий модуль М353005 W-диапазона, параметры которого приведены в таблице, предназначается для работы в составе высокоскоростных радиорелейных станций с пропускной способностью 100 Мбит/с. Функционально он представляет собой радиомодем для передачи потока данных со скоростью 100 Мбит/с (Fast Ethernet) в сетях с топологиями типа «точка—точка» или с многоточечным доступом и временным разделением каналов (TDMA). В этом приемопередающем модуле используется частотное разделение канала приема и канала передачи, что обеспечивает возможность полнодуплексного режима работы в составе радиорелейной станции. Пропускная способность канала связи при таком решении составляет 100 Мбит/с в каждом направлении.

Уровень выходной импульсной мощности передатчика — более 50 мВт — обеспечивается применением умножителей частоты на основе кремниевых IMPATT-диодов производства НИИ «Орион». Такое техническое решение гарантирует большое время наработки на отказ и отсутствие необходимости обслуживания. При этом существенно упрощается схема модуля, т. к. переносчиком сигнала на высокую частоту, модулятором и оконечным каскадом передатчика выступает единый элемент — активный умножитель частоты.

По своим эксплуатационным характеристикам радиорелейные станции, выполненные на основе приемопередающих модулей производства НИИ «Орион», соответствуют рекомендациям Международного консультативного комитета по радиосвязи, удовлетворяют требованиям, предъявляемым к стандартной аппаратуре линий связи, и потенциально обеспечивают передачу и прием информации со скоростью до 100 Мбит/с в условиях сложной электромагнитной обстановки городов и промышленных районов с дальностью действия до 10 км при вероятности ошибки не более 10^{-7} .

Аннотации на русском языке

УДК 681.3

Муров С. Ю. **Сшивка полигонов на двухслойной печатной плате** (стр. 3—4)

Предложен метод решения задачи подключения максимального числа изолированных островков металлизированных областей одной цепи, расположенных на разных слоях печатной платы. Метод может быть использован в процессе автоматической трассировки плат.

Россия, Санкт-Петербургский гос. ун-т телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.

Ключевые слова: печатная плата, триангуляция, квазитриангуляция.

УДК 004.31:004.22:534:621.382

Липинский А. Ю., Рудякова А. Н., Данилов В. В. **Фоторефрактивные кристаллы в запоминающих устройствах оптоэлектронных процессоров корреляционного типа** (стр. 5—9)

Представлен обзор оптических и акустооптических процессоров корреляционного типа, использующих фоторефрактивные кристаллы. Оптические корреляторы являются эффективными устройствами для распознавания образов благодаря быстройдействию, обусловленному параллельностью обработки больших массивов информации. Рассмотрены голографические корреляторы совместного преобразования, обеспечивающие инвариантность к сдвиговым искажениям, динамический голографический коррелятор, акустооптические корреляционные процессоры с памятью.

Украина, Донецкий национальный университет.

Ключевые слова: фоторефрактивный кристалл, голографический коррелятор, акустооптический корреляционный процессор.

УДК 621.3.088.7

Редько В. В. **Математическая модель процесса избыточных измерений при непрерывном воздействии измеряемой физической величины на чувствительный элемент датчика** (стр. 10—12)

Статья посвящена вопросам повышения точности измерений физических величин при использовании измерительного канала с нелинейной градуировочной характеристикой. Предложена математическая модель, описывающая процесс избыточных измерений для случая, когда функция преобразования измерительного канала представляет собой полином третьей степени.

Украина, г. Киев, ООО «Сейм-93».

Ключевые слова: математическая модель, методы избыточных измерений, автоматическая коррекция погрешностей.

УДК 621.382.3

Алтухов А. А., Зяблук К. Н., Митягин А. Ю., Талипов Н. Х., Чучева Г. В. **Модель алмазного транзистора** (стр. 13—19)

Разработана модель плавного затвора, достаточно хорошо описывающая работу полевого алмазного СВЧ-транзистора. Используя данную модель можно рассчитать его характеристики по электрофизическим параметрам алмазной структуры с δ -легированным (водородом или бором) слоем и по геометрическим параметрам элементов транзистора. Рассчитанные основные параметры модельного СВЧ-транзистора достаточно хорошо согласуются с опубликованными экспериментальными результатами измерений реальных СВЧ-транзисторов.

Россия, г. Фрязино, ПТЦ «УралАлмазИнвест», Фрязинский филиал ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН.

Ключевые слова: полевой алмазный СВЧ-транзистор, модель плавного затвора, вольт-амперная характеристика, максимальная мощность транзистора, коэффициенты усиления транзистора.

УДК 621.397.13

Ковальчук В. А., Севастьянов В. В. **Гибридная интегральная схема для обработки звукового сигнала** (стр. 20—22)

Разработанная гибридная интегральная схема с номинальным напряжением питания 1,4 В, током потребления 0,7 мА и габаритными размерами 8×4×3 мм обеспечивает multifunctional обработку звукового сигнала в аналоговой микросистемной аппаратуре. Приведены ее конструкторско-технологические и электрические параметры.

Украина, г. Винница, НИИ «Гелий».

Ключевые слова: гибридная интегральная схема, звуковой сигнал, электрические параметры.

УДК 621.382

Щербатова Г. Ю., Дилевский А. А., Крылов В. Н., Логвинов О. В., Плацинда О. Е. **Повышение помехоустойчивости бинаризации изображений фотошаблонов в пространстве вейвлет-преобразования** (стр. 23—26)

Предложены информационная технология анализа гистограмм и метод помехоустойчивой бинаризации изображений фотошаблонов (ФШ) ИС и печатных плат (ПП) на ее основе. Этот метод, основанный на применении субградиентного итеративного помехоустойчивого метода оптимизации, удовлетворяет требованиям задачи автоматизированного оптического контроля ФШ и ПП по погрешности и помехоустойчивости. Ошибка бинаризации не превышает 1 пикселя при значениях отношения сигнал/шум больше чем 7.

Украина, Одесский национальный политехнический университет.

Ключевые слова: бинаризация, вейвлет - преобразование, субградиент, помехоустойчивость.

УДК 621.794.4:546.87'24

Павлович И. И., Томашик З. Ф., Томашик В. Н., Стратийчук И. Б. **Формирование полированной поверхности халькогенидов Vi и Sb в травильных композициях $K_2Cr_2O_7-HBr$** (стр. 27—29)

Разработаны полирующие травители и даны рекомендации по их применению для обработки полупроводниковых материалов, которые используются для изготовления рабочих элементов термоэлектрических приборов.

Украина, г. Киев, ИФП им. В. Е. Лашкарева НАНУ.

Ключевые слова: полирующий травитель, халькогениды висмута, поверхность, химическое травление.

УДК 621.382

Попов В. М., Клименко А. С., Поканевич А. П., Самотовка В. Л. **Метод определения температуры и теплового сопротивления точек поверхности кристалла интегральной схемы** (стр. 30—34)

Предложен метод визуального отображения температуры поверхности кристалла интегральной схемы (ИС) в пленке холестерического жидкого кристалла, осажденной на поверхность из раствора. Границы наблюдаемых локальных областей — изотермы с температурой соответствующего фазового перехода. По положению изотерм и мощности, потребляемой кристаллом ИС, определяются тепловые сопротивления между его поверхностью и средой.

Украина, г. Киев, НИИ микроприборов.

Ключевые слова: интегральная схема, тепловое сопротивление, жидкий кристалл, фазовое состояние.

УДК 621.315.592

Нелюба П. Л. **Особенности конденсации фуллеренов из молекулярного пучка в вакууме** (стр. 35—39)

Исследована конденсация пучка фуллеренов C_{60} в вакууме на неподогретые подложки из Si, GaAs, слюды, покровного стекла. Использованы методы атомно-силовой микроскопии, рамановского рассеяния, измерения механических напряжений в пленке. Установлено, что молекулы C_{60} могут распадаться на

Ключевые слова: фуллерены; сублимация; конденсация; углеродные фазы; морфология поверхности; комбинационное рассеяние света.

подложках с образованием других углеродных структур в конденсате без дополнительных физических воздействий на сублимированный пучок в пространстве «испаритель — подложка». Показана возможность увеличения размера зерен и уменьшения механических напряжений в конденсате.

Украина, г. Киев, ИФП им. В. Е. Лашкарёва НАНУ.

УДК 537.226.4; 537.226.82

Кузенко Д. В., Бажин А. И., Ступак В. А., Кисель Н. Г., Дорофеева В. В., Старшинов И. Н., Покинтелица А. Е. **Исследование процесса термической деполяризации сегнетокерамики $(\text{Pb,Sr})(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$** (стр. 40—42)

Представлены результаты рентгено- и микроструктурных, а также пьезоэлектрических исследований сегнетокерамических образцов на основе твердого раствора $(\text{Pb}_{0,95}\text{Sr}_{0,05})(\text{Zr}_{0,58}\text{Ti}_{0,42})\text{O}_3$, подвергнутых отжигу. Показано, что отжиг при критической температуре $T_{\text{кр}}$, которая ниже точки Кюри, приводит к разупорядочению доменной структуры, в результате чего происходит резкое снижение пьезоэлектрических свойств. Проведена оценка энергии пиннинга доменных стенок на дефектах структуры.

Украина, г. Донецк, НТЦ «Реактивэлектрон» НАНУ; ДонНУ.

Ключевые слова: сегнетокерамика, деполяризация, доменная структура, критическая температура.

УДК 621.315.592.2:546.681”19

Каримов А. В., Ёдгорова Д. М., Абдулхаев О. А., Каримов А. А., Асанова Г. О. **Исследование допустимой импульсной мощности кремниевой p^+-p-n^+ -структуры** (стр. 43—45)

Исследования показали, что при уменьшении толщины базовой области пропорционально уменьшается тепловое сопротивление структуры, а зависимость перегрева $p-n$ -перехода от импульсной мощности приближается к экспоненциальной, что увеличивает выдерживаемую мощность. Так, например, для заданной температуры перегрева уменьшение толщины базовой области от 500 до 250 мкм может значительно (до 30%) повысить допустимую мощность диодной структуры.

Узбекистан, г. Ташкент, ФТИ НПО «Физика-Солнце».

Ключевые слова: импульсная мощность, температура перехода, тепловое сопротивление, толщина базы, температура.

УДК 621.317.7+389.1 (075.8)

Короткий В. П., Ильин В. Н. **Измерительный преобразователь индифферентный к хаотическому возбуждению чувствительного элемента** (стр. 46—48)

Предлагается схема преобразователя, не чувствительная к возникновению в ней динамического хаоса, с широкой полосой пропускания и линейной передаточной характеристикой. Преобразователь может найти применение в качестве магнитной антенны для приема магнитной составляющей электромагнитного поля в радиочастотном диапазоне, анализаторах спектра магнитных шумов, для определения формы магнитных импульсов.

Беларусь, г. Минск, Институт физики им. Б. И. Степанова НАНБ.

Ключевые слова: феррозонд, магнитомодуляционный преобразователь, ферромодуляционный преобразователь, динамический хаос, детерминированный хаос.

УДК 622.3.032.266

Часнык В. И. **Фокусировка интенсивных электронных потоков в спиральной ЛБВ с МПФС с несинусоидальным полем** (стр. 49—52)

Приведены экспериментальные результаты по токопрохождению интенсивных электронных потоков в высоковольтных ЛБВ с МПФС с несинусоидальным полем при больших значениях параметра магнитного поля α . Показано, что при $1,0 < \alpha < 1,15$ коэффициент токопрохождения на коллектор составляет 85—91% в статическом и 78—85% в динамическом режиме, а при значениях $\alpha > 1,4$, соответствующих второй области устойчивости, токопрохождение составляет 82% в статике и 75% в динамике.

Украина, г. Киев, НИИ «Орион».

Ключевые слова: ЛБВ, спиральная замедляющая система, МПФС с несинусоидальным полем, параметр магнитного поля, область устойчивости.

Анотації українською мовою

УДК 681.3

Муров С. Ю. **Зшивання полігонів на двошаровій друкованій платі** (стор. 3—4)

Запропоновано метод розв'язання задачі підключення максимального числа ізольованих острівців металізованих областей одного ланцюга, розташованих на різних шарах друкованої плати. Метод може бути використаний в процесі автоматичного трасування плат.

Росія, Санкт-Петербурзький держ. ун-т телекомунікацій ім. проф. М. О. Бонч-Бруєвича.

Ключові слова: друкована плата, триангуляція, квазитриангуляція.

УДК 004.31:004.22:534:621.382

Ліпінський О. Ю., Рудякова Г. М., Данилов В. В. **Фоторефрактивні кристали в запам'ятовуючих пристроях оптикоелектронних процесорів кореляційного типу** (стор. 5—9)

У роботі представлено огляд оптичних і акустооптичних процесорів кореляційного типу, що використовують фоторефрактивні кристали. Оптичні корелятори належать до пристроїв, що ефективно вирішують завдання з розпізнавання образів завдяки швидкодії, яка обумовлена паралельністю обробки великих масивів інформації. Розглянуті голографічні корелятори спільного перетворення, що забезпечують покращену інваріантність до зсуву, динамічний голографічний корелятор, акустооптичні кореляційні процесори з пам'яттю.

Україна, Донецький національний університет.

Ключові слова: фоторефрактивний кристал, голографічний корелятор, акустооптичний кореляційний процесор.

УДК 621.3.088.7

Редько В. В. **Математична модель процесу надлишкових вимірювань при неперервному впливі вимірюваної фізичної величини на чутливий елемент сенсора** (стор. 10—12)

Стаття присвячена питанням підвищення точності вимірювань фізичних величин при використанні вимірювального каналу з нелінійною градуовальною характеристикою. Запропоновано математичну модель, що описує процес надлишкових вимірювань для випадку, коли функція перетворення вимірювального каналу являє собою поліном третього степеня.

Україна, м. Київ, ТОВ «Сейм-93».

Ключові слова: математична модель, методи надлишкових вимірювань, автоматична корекція похибок.

УДК 621.382.3

Алтухов А. О., Зяблюк К. Н., Мітягін О. Ю., Таліпов Н. Х., Чучева Г. В. **Модель алмазного транзистора** (стор. 13—19)

Розроблено модель плавного затвору, яка досить добре описує роботу польового алмазного НВЧ-транзистора. Використовуючи дану модель можна розрахувати його характеристики за електрофізичними параметрами алмазної структури з δ -легованим (воднем або бором) шаром та за геометричними параметрами елементів транзистора. Розраховані основні параметри модельного НВЧ-транзистора досить добре узгоджуються з опублікованими експериментальними результатами вимірювань реальних НВЧ-транзисторів.

Росія, м. Фрязіно, ВТЦ «УралАлмазІнвест», Фрязінська філія ІРЕ ім. В. А. Котельникова РАН.

Ключові слова: польовий алмазний НВЧ-транзистор, модель плавного затвора, вольт-амперна характеристика, максимальна потужність транзистора, коефіцієнти посилення транзистора.

УДК 621.397.13

Ковальчук В. О., Севастьянов В. В. **Гібридна інтегральна схема для обробки звукового сигналу** (стор. 20—22)

Розроблена гібридна інтегральна схема з номінальною напругою живлення 1,4 В, струмом споживання 0,7 мА і габаритними розмірами 8×4×3 мм забезпечує багатофункціональну обробку звукового сигналу в аналоговій мікроелектронній апаратурі. Наведено її конструкторсько-технологічні та електричні параметри.

Україна, м. Вінниця, НДІ «Гелій».

Ключові слова: гібридна інтегральна схема, звуковий сигнал, електричні параметри.

УДК 621.382

Щербакова Г. Ю., Ділевський А. А., Крилов В. М., Логвинов О. В., Плачинда О. С. **Підвищення завадостійкості бінаризації зображень фотошаблонів в просторі вейвлет-перетворення** (стор. 23—26)

Запропоновано інформаційну технологію аналізу гістограм та метод завадостійкої бінаризації зображень фотошаблонів (ФШ) ІС та друкованих плат (ДП) на її основі. Цей метод, заснований на застосуванні субградієнтного ітеративного завадостійкого методу оптимізації, задовольняє вимогам задачі автоматизованого оптичного контролю ФШ і ПП за похибкою та завадостійкістю. Помилка бінаризації не перевищує 1 пікселя при значенні відношення сигнал/шум більш ніж 7.

Україна, Одеський національний політехнічний університет.

Ключові слова: бінаризація, вейвлет-перетворення, субградієнт, завадостійкість.

УДК 621.794.4 : 546.87'24

Павлович І. І., Томашик З. Ф., Томашик В. М., Стратійчук І. Б. **Формування полірованої поверхні халькогенидів Bi та Sb в травильних композиціях $K_2Cr_2O_7-HBr$** (стор. 27—29)

Розроблено поліруючі травителі і надано рекомендації щодо їх застосування для обробки напівпровідникових матеріалів, які використовуються для виготовлення робочих елементів термоелектричних приладів.

Україна, м. Київ, ІФП ім. В. Є. Лашкарьова НАНУ.

Ключові слова: поліруючий травник, халькогеніди вісмуту, поверхня, хімічне травлення.

УДК 621.382

Попов В. М., Клименко А. С., Поканевич О. П., Самотовка В. Л. **Метод визначення температури та теплового опору точок поверхні кристала інтегральної схеми** (стор. 30—34)

Запропоновано метод візуального відображення температури поверхні кристала інтегральної схеми (ІС) в плівці х олестеричного рідкого кристала, осаджених на поверхню із розчину. Границі локальних областей є ізотермами з температурами відповідних фазових переходів. По положенню ізотерм і потужності, яку споживає кристал ІС, визначаються теплові опори між поверхнею і середовищем.

Україна, м. Київ, НДІ мікроприладів.

Ключові слова: інтегральна схема, тепловий опір, рідкий кристал, фазовий стан.

УДК 621.315.592

Нелюба П. Л. **Особливості конденсації фулеренів з молекулярного пучка у вакуумі** (стр. 35—39)

Досліджено конденсацію пучка фулеренів C_{60} у вакуумі на непідігріті підкладки з Si, GaAs, слюди, покривного скла. Використано методи атомно-силової мікроскопії, раманівського розсіяння, вимірювання механічних напруг у плівці. Встановлено, що молекули C_{60} можуть розпадатися на підкладках з утворенням інших вуглецевих структур в конденсаті без додаткових фізичних впливів на сублімований пучок у просторі «випарник — підкладка». Показано можливість збільшення розміру зерен і зменшення механічної напруги в конденсаті.

Україна, м. Київ, ІФП ім. В. Є. Лашкарьова НАНУ.

Ключові слова: фулерени; сублімація; конденсація; вуглецеві фази; морфологія поверхні; комбінаційне розсіювання світла.

УДК 537.226.4; 537.226.82

Кузенко Д. В., Бажин А. І., Ступак В. А., Кисіль М. Г., Дорофєєва В. В., Старшинов І. М., Покінтеліца А. Э. **Дослідження процесу термічної деполяризації сегнетокераміки (Pb, Sr) (Zr, Ti) O₃** (стор. 40—42)

Представлено результати рентгено- та мікроструктурних, а також п'єзоелектричних досліджень сегнетокерамічних зразків на основі твердого розчину $(Pb_{0.95}Sr_{0.05})(Zr_{0.58}Ti_{0.42})O_3$, підданих відпалу. Показано, що відпал при критичній температурі $T_{кр}$, яка нижче точки Кюрі, призводить до розупорядкування доменної структури, в результаті чого відбувається різке зниження п'єзоелектричних властивостей. Проведено оцінку енергії піннінга доменних стінок на дефектах структури.

Україна, м. Донецьк, НТЦ «Реактивелектрон» НАНУ; ДонНУ.

Ключові слова: сегнетокераміка, деполяризація, доменна структура, критична температура.

УДК 621.315.592.2:546.681''19

Карімов А. В., Йодгорова Д. М., Абдулхаєв О. А., Карімов А. А., Асанова Г. О. **Дослідження допустимої імпульсної потужності кремнієвої p^+-p-p^+ -структури** (стор. 43—45)

Дослідження показали, що при зменшенні товщини базової області пропорційно зменшується тепловий опір структури, а залежність перегріву $p-p$ -переходу від імпульсної потужності наближається до експоненційної, що збільшує витримувану потужність. Так, наприклад, для заданої температури перегріву зменшення товщини базової області від 500 до 250 мкм дозволяє значно (до 30%) підвищити допустиму потужність діодної структури.

Узбекистан, м. Ташкент, ФТІ НВО «Фізика-Сонце».

Ключові слова: імпульсна потужність, температура переходу, тепловий опір, товщина бази, температура.

УДК 621.317.7+389.1 (075.8)

Короткий В. П., Ільїн В. М. **Вимірювальний перетворювач індиферентний до хаотичного збудження чутливого елемента** (стор. 46—48)

Пропонується схема перетворювача, не чутлива до виникнення в ній динамічного хаосу, з широкою смугою пропускання і лінійною передавальною характеристикою. Перетворювач може бути застосовуваний як магнітна антена для прийому магнітної складової електромагнітного поля в радіочастотному діапазоні, аналізаторах спектра магнітних шумів, для визначення форми магнітних імпульсів.

Білорусь, м. Мінськ, Інститут фізики ім. Б. І. Степанова НАНБ.

Ключові слова: феррозонд, магнітомодуляційний перетворювач, ферромодуляційний перетворювач, динамічний хаос, детермінований хаос.

УДК 622.3.032.266

Часник В. І. **Фокусування інтенсивних електронних потоків у спіральній ЛБВ із МПФС із несинусоїдальним полем** (стор. 49—52)

Наведено експериментальні результати зі струмобігу інтенсивних електронних потоків у високовольтних ЛБВ із МПФС із несинусоїдальним полем при більших значеннях параметру магнітного поля α . Показано, що при $1,0 < \alpha < 1,15$ коефіцієнт струмобігу на колектор складає 85—91% в статичному та 78—85% в динамічному режимі, а при значеннях $\alpha > 1,4$, що відповідають другій області стійкості, струмобіг складає 82% у статистиці та 75% у динаміці.

Україна, м. Київ, НДІ «Оріон».

Ключові слова: ЛБВ, спіральна уповільнююча система, МПФС з несинусоїдальним полем, параметр магнітного поля, зона стійкості.

Abstracts in English

UDC 681.3

Murov S. Yu. **Merging polygons on two-layer printed circuit board** (p. 3—4)

A method is proposed for solving the problem of connection of maximum number of isolated islands of metallized areas of the same chain, located on different layers of the printed circuit board. The method can be used in the automatic tracing of the boards.

Russia, The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications.

Keywords: printed circuit board, triangulation, quasitriangulation.

UDC 004.31:004.22:534:621.382

Lipinskii A. Y., Rudiakova A. N., Danilov V. V. **Photorefractive crystals for the storage elements of optoelectronic correlation processors** (p. 5—9)

The paper presents review of optical and acousto-optic correlation processors that contain photorefractive crystals. Optical correlators are the efficient devices for the image recognition due to the parallel way high operation rate processing of significant data amount. The shift-invariant holographic joint-transform correlators, dynamic holographic correlator, acousto-optic correlation processors with memory were considered.

Ukraine, Donetsk National University.

Keywords: photorefractive crystal, holographic correlator, acousto-optic correlation processor.

UDC 621.3.088.7

Redko V. V. **Mathematical model of process of redundant measurements with uninterrupted influence of measurand on sensing element of sensor** (p. 10—12)

The paper discusses improvement of accuracy of measurands measurements with the use of measuring channel with nonlinear calibration curve. There is proposed a mathematical model, which describes process of redundant measurements for measuring channel when it's measurement function is a polynomial of third power.

Ukraine, Kyiv, Seim-93 Ltd.

Keywords: mathematical model, methods of redundant measurements, automatic errors correction.

UDC 621.382.3

Altukhov A. A., Zyabluk K. N., Mityagin A. Yu., Talipov N. H., Chucheva G. V. **The diamond RF-transistor model** (p. 13—19)

In this work is shown that fluent shutter model it is enough well describes work field-effect diamond RF-transistors. Using this model, possible to calculate transistor parameters used electronic parameters of the diamond structure with δ -doped (hydrogen or boron) layer and geometric parameter transistor element. Proof, are calculated by us main parameters model RF-transistor, which it is enough close comply with published experimental result of the measurements real RF-transistors.

Russia, Fryazino, TCP "UralAlmazInvest" Fryazino Branch of Kotel'nikov IRE of RAS.

Keywords: field-effect diamond RF-transistor, fluent shutter model, volt-ampere characteristic, maximum power of transistor, gain of the transistor.

ABSTRACTS

UDC 621.397.13

Koval'chuk V. A., Sevast'yanov V. V. **Hybrid integrated circuits for sound signal processing** (p. 20—22)

Developed hybrid integrated circuit with rated supply voltage of 1,4 V, current consumption 0,7 mA and overall dimensions 8×4×3 mm provides soft processing of the audio signal in analog microelectronic equipment. Given its konstruktorsko-technological and electrical parameters.

Ukraine, Vinnitsa, Research Institute «Helium».

Keywords: hybrid integrated circuits, audio signal, electrical parameters.

UDC 621.382

Shcherbakova G. Yu., Dilevsky A. A., Krylov V. N., Logvinov O. V., Plachinda O. E. **Increase of noise immunity of photomask images binarization in the space of the wavelet transform** (p. 23—26)

An information technology for histogram analysis and a method for noise immunity binary processing of integrated and printed circuits board photo-masks image based on this technology was carried out. This method based on the sub-gradient iterative noise stability optimization method satisfies the demands of the automated optical control of photo-masks and printed circuits in the error and noise immunity. The maximum binary processing error does not exceed 1 pixel if the signal-to-noise ratio is more than 7.

Ukraine, Odessa National Polytechnic University.

Keywords: binarization, wavelet-transform, subgradient, noise immunity.

UDC 621.794.4: 546.87'24

Pavlovich I. I., Tomashik Z. F., Tomashik V. N., Stratiichuk I. B. **Formation of polished surface of Bi and Sb chalcogenides in pickling compositions $K_2Cr_2O_7-HBr$** (p. 27—29)

The polishing etchants were developed and recommendations were given as to their use for processing of semiconductor materials which are used for the manufacture of work items of thermoelectric devices.

Ukraine, Kiev, V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics.

Keywords: polishing etchant, bismuth chalcogenides, surface, chemical etching.

UDC 621.382

Popov V. M., Klimenko A. S., Pokanevich A. P., Samotovka V. L. **Method of determination of temperature and heat resistance of the points on the integrated circuit crystal surface** (p. 30—34)

Method for visualization of integrated circuit (IC) surface temperature by means of the liquid crystal film deposited from solution on its surface is proposed. The boundaries of local regions represent isotherms with corresponding phase transitions. On the base of isotherms positions and consumed by IC power thermal resistances between crystal and environment are determined.

Ukraine, Kiev, Research Institute for Microdevices.

Keywords: integrated circuit, heat resistance, liquid crystal, phase state.

UDC 621.315.592

Neluba P. L. **Peculiarities of fullerenes condensation from molecular beam in vacuum** (стр. 35—39)

There was investigated C_{60} fullerenes condensation in vacuum on unheated Si, GaAs, isinglass stone substrates. There were used atomic-force microscopy, Raman scattering and measurement of mechanical stresses in films. It is established that the C_{60} molecule can decay on the substrates with the formation of other carbon structures in the condensate without supplementary physical effects on the sublimated beam in «evaporator — substrate» space. The possibility was found to increase the grain size and reduce the mechanical stresses in the condensate.

YUkraine, Kyiv, V. Lashkaryov institute of semiconductor physics of NASU.

Keywords: fullerenes, sublimation, condensation, carbon allotropes, surface morphology, Raman spectroscopy.

UDC 537.226.4; 537.226.82

Kuzenko D. V., Bazhin A. I., Stupak V. A., Kisel M. G., Dorofeeva V. V., Starshinov I. M., Pokintelitsa A. E. **Research of the process of thermal depolarization of ferroelectric ceramics (Pb, Sr) (Zr, Ti) O₃** (p. 40—42)

The article presents the results of X-ray, microstructural and piezoelectric researches of ferroelectric ceramics samples based on solid solution (Pb_{0,95}Sr_{0,05})(Zr_{0,58}Ti_{0,42})O₃, subjected to annealing. It is shown that annealing at the critical temperature T_{cr} , which is below the Curie point, leads to disordering of the domain structure, resulting in a sharp decrease in the piezoelectric properties. This behavior is explained by the different response to temperature change of lattice polarization and of polarization conditioned by the presence of domain structure. The estimation of the energy of domain walls pinning on structural defects is given.

Ukraine, Donetsk, STC «Reactivelectron» NASU, Donetsk National University.

Keywords: ferroelectrics ceramic, depolarization, domain structure, critical temperature.

UDC 621.315.592.2:546.681"19

Karimov A. V., Yodgorova D. M., Abdulhaev O. A., Karimov A. A., Asanova G. O. **Research of the tolerable pulsed power of silicon p^+-p-n^+ -structure** (p. 43—45)

The conducted researches of the thermal parameters of the silicon p^+-p-n^+ -structure under the influence of the pulse signal have shown that the structure thermal resistance decreases in proportion to the decrease in the thickness of the base region and the dependence of the superheating temperature of the pulsed power is close to exponential, which increases the withstanding capacity. A decrease in the thickness of the base region from 500 to 250 microns for a given temperature overheating can improve power handling diode p^+-p-n^+ -structure by 30%.

Uzbekistan, Tashkent, PTI SPA "Physics-Sun".

Keywords: pulse power, the transition temperature, thermal resistance, base thickness and temperature.

UDC 621.317.7+389.1 (075.8)

Korotkii V. P., Il'in V. N. **The measuring converter indifferent to chaotic excitation of a sensitive element** (p. 46—48)

The scheme of the converter insensitive to occurrence in it of dynamic chaos, with wide pass band and the linear transfer characteristic is offered. The converter can be used as a magnetic antenna for receiving the magnetic component of electromagnetic field in the radio frequency spectrum, in magnetic noise analyzers, for determination of the shape of the magnetic pulses.

Belarus, Minsk, B. I. Stepanov Institute of Physics of NASB.

Keywords: flaxgate sensor, magnetic-modulation converter, ferro-modulation converter, dynamical chaos, deterministic chaos.

UDC 622.3.032.266

Chasnyk V. I. **Focusing of intensive electron beams in helix TWT with PPM focusing system with nonsinusoidal field** (p. 49—52)

Experimental results on beam transmission of intensive electron beams in high-voltage TWT with PPM focusing system with nonsinusoidal field at great values of magnetic field parameter α are presented. It is shown, that at $1,0 < \alpha < 1,15$, beam transmission to a collector is 85—91% in static and 78—85% in dynamic regime, and at values of $\alpha > 1,4$, which correspond to the second region of stability, conductance is 82% in statics and 75% in dynamics.

Ukraine, Kiev, Research Institute «Orion».

Keywords: TWT helical slow-wave system, PPM with non-sinusoidal field, magnetic field parameter, stability region.

- Антощук Светлана Григорьевна*, д-р. техн. наук, директор Института компьютерных систем Одесского национального политехнического университета, зав. кафедрой «Информационные системы»
- Ащеулов Анатолий Анатольевич*, д-р. техн. наук, главный научный сотрудник, Черновицкий национальный университет им. Ю. Федьковича
- Баранов Валентин Владимирович*, д-р. техн. наук, профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск
- Голуб Владислав Сергеевич*, канд. техн. наук, научный консультант, НПФ "VD MAIS", г. Киев
- Данилов Владимир Васильевич*, д-р. техн. наук, доцент, Донецкий национальный университет
- Ермак Геннадий Павлович*, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт радиопизики и электроники им. А. Я. Усикова НАНУ, г. Харьков
- Ефименко Анатолий Афанасьевич*, канд. техн. наук., доцент, Одесский национальный политехнический университет
- Катрунов Константин Алексеевич*, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт сцинтилляционных материалов НАНУ, г. Харьков
- Корбутяк Дмитрий Васильевич*, докт. физ.-мат. наук, профессор, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАНУ, г. Киев
- Кудрик Ярослав Ярославович*, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАНУ, г. Киев
- Макаров Анатолий Владимирович*, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАНУ, г. Киев
- Маслов Владимир Петрович*, канд. техн. наук, заместитель директора, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАНУ, г. Киев
- Мокрицкий Вадим Анатольевич*, докт. техн. наук, зав. кафедрой, Одесский национальный политехнический университет
- Николаенко Юрий Егорович*, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, НТУУ «Киевский политехнический институт»
- Перевертайло Владимир Леонтьевич*, канд. физ.-мат. наук, зам. директора по научной работе, НИИ микроприборов НТК «ИМК» НАНУ
- Петлицкий Александр Николаевич*, канд. физ.-мат. наук, начальник лаборатории, УП «Завод полупроводниковых приборов» НПО «Интеграл», г. Минск
- Сибиряков Владимир Владимирович*, канд. техн. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет
- Сорокин Виктор Михайлович*, докт. техн. наук, профессор, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАНУ, г. Киев
- Томашик Василий Николаевич*, докт. хим. наук, ученый секретарь, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАНУ, г. Киев
- Чегиль Иван Иванович*, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, директор НТЦ «Микроэлектроника» НПП "Карат", г. Львов
- Шеремет Владимир Николаевич*, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАНУ, г. Киев
- Шинкаренко Владимир Викторович*, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАНУ, г. Киев
- Stevanovic Jasmina*, Prof., Ph.D., University of Belgrade, Institute of chemistry, technology and metallurgy
- Zoran Stevic*, Prof. dr., University of Belgrade, Technical Faculty in Bor



РОССИЯ ИННОВАЦИОННАЯ

17–20 апреля 2012

ЦВК «Экспоцентр»

<http://www.expocentr.ru/ru/expoinex/russia/>

В рамках Недели «Россия инновационная» запланирована насыщенная конгрессная программа, включающая в себя общее пленарное заседание, тематические сессии, круглые столы, презентации проектов, конкурсы и другие мероприятия, в том числе:



ФОТОНИКА-2012

МИР ЛАЗЕРОВ И ОПТИКИ

7-я международная специализированная выставка
лазерной оптической и оптоэлектронной техники

7-я международная специализированная
выставка лазерной, оптической
и оптоэлектронной техники
«Фотоника. Мир лазеров и оптики-2012»



13-й МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ

ВЫСОКИЕ
ТЕХНОЛОГИИ
XXI
ВЕКА

13-й международный форум
«Высокие технологии XXI века-2012»



МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА

НАВИТЕХ

17–19
апреля 2012

Международный проект
«Навигационные системы, технологии и услуги»:
4-я международная выставка «Навитех-2012»
6-й международный форум по спутниковой
навигации

НОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА-2012

Деловой форум и выставка
«Новая электроника-2012»

ЭкспоКонтроль-2012

4-я специализированная выставка приборов
и средств контроля, измерений и испытаний
«ЭкспоКонтроль-2012»



НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ НИИ ТОЧНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Малогабаритная вакуумная установка магнетронного напыления настольного типа

МВУ ТМ-Магна Т



Назначение:

Нанесение плёнок металлов (Cu, Cr, Al, и др.)
и диэлектриков (SiO_2 , Si_3N_4 , др.) методом магнетронного распыления.

Особенности:

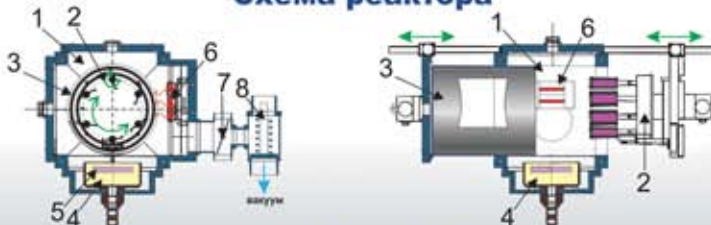
- Групповая обработка пластин:

60x48 мм	- 6шт.	- двухсторонняя обработка.
Ø 150 мм	- 2шт.	- односторонняя обработка.
Ø 60, 76, 100 мм	- 4шт.	
- Откачка реактора до предельного разряжения $5 \cdot 10^{-4}$ Па;
- Подготовка поверхности подложек – нагрев и ВЧ ионная очистка.
- Автоматизированное управление от микропроцессора.
- Малогабаритная безмасляная вакуумная система откачки.
- Автономная система водяного охлаждения.
- Потребляемая мощность не более 5,5 кВт.
- Площадь, занимаемая одной установкой $\sim 1,5 \text{ м}^2$.
- Возможны комбинации нескольких источников на одной рабочей камере.

Системы установки:

- Рабочая камера (1);
- Планетарный подложкодержатель (2);
- Вращающийся экран – цилиндрическая заслонка (3);
- Магнетронное распылительное устройство (магнетрон) (4), в том числе распыляемая мишень (5);
- Источник питания магнетрона;
- Система нагрева и ионной очистки (6);
- Вакуумная система на базе турбомолекулярного и форвакуумного насосов, в том числе дроссельная заслонка (7), клапан (8);
- Газовая система – включает электронный регулятор расхода газа, ручной запорный кран, регулятор давления, манометр, электромагнитный клапан;
- Система водяного охлаждения;
- Микропроцессорная система управления.

Схема реактора



Схемы модификаций реакторов



МВУ ТМ-Магна Т x 2

МВУ ТМ-Магна Т x 3

Россия, 124460 Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, 10
Телефон: +7 (495) 229-75-01 Факс: +7 (495) 229-75-22
Почта: info@niitm.ru Сайт: www.niitm.ru

Номер готовили

Белград, Винница, Донецк, Киев, Минск,
Одесса, С.-Петербург, Ташкент,
Фрязино.



Пишите

Подписывайтесь

Читайте